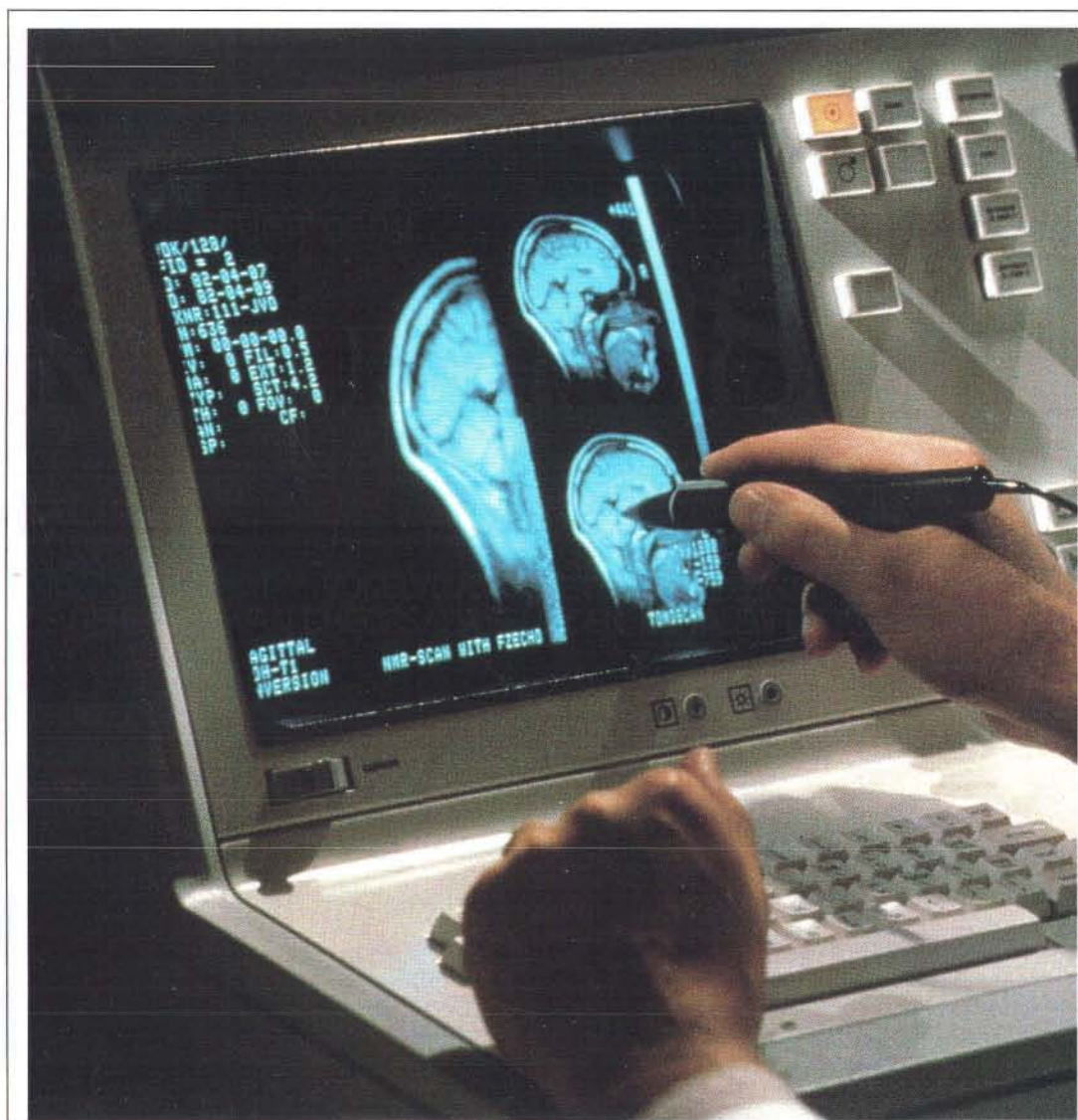


8

56^e jaargang

NATUUR '88 & TECHNIEK

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



MEDISCHE NMR/ VOGELVLUCHT/METEN IN BEELDEN/
DE GEHEIMEN VAN CHEOPS/TWEELINGEN/METALEN MET GEHEUGEN

I GEVRAAGD AAN DE I I UNIVERSITEIT GRONINGEN I

hoofd instrumentmakerij v/m

(vac.nr. 880513/1237)

bij de Interuniversitaire Werkgroep voor Astronomische Instrumentatie gevestigd in de Kapteyn Sterrenwacht te Roden.

De werkgroep:

De werkgroep is een interuniversitaire samenwerking opgezet door de universiteiten van Groningen en Leiden ten dienste van de gehele Nederlandse sterrenkunde. Doelstelling is de ontwikkeling van optische instrumenten voor gebruik op diverse internationale sterrenwachten. Het gaat daarbij vooral om de nieuwe sterrenwacht op de Canarische eilanden (een Brits-Nederlands-Spaans project) en om de Europese Zuidelijke Sterrenwacht (ESO), die binnenkort begint met de bouw van 's werelds grootste optische telescoop (vier 8-meter spiegels).

De werkgroep omvat 15 medewerkers en is interdisciplinair van samenstelling. De instrumentmakerij bestaat uit een hoofd en twee medewerkers, en neemt een belangrijke plaats in binnen de werkgroep.

De Kapteyn Sterrenwacht is zeer aantrekkelijk gelegen, in een gemeente die als centrum voor Noord-Drenthe veel faciliteiten biedt.

Taakomschrijving:

- verantwoordelijkheid voor dagelijkse leiding, coördinatie en veiligheid in de instrumentmakerij; zorg voor het machinepark (o.a. met het oog op plannen voor aanschaf van CNC apparatuur)
- opstellen van doelmatige begrotingen en meerjaren planning
- ontwerpen, bouwen en testen van hoogwaardige mechanische apparatuur voor toepassing in astronomische meetinstrumenten; zorg voor optimale integratie van de mechanische componenten met de andere onderdelen (optiek en electronica) van deze instrumenten. Kwaliteitsbewaking, ook wat betreft werktekeningen en documentatie. In voorkomende gevallen fungeren als projectleider, en deelnemen aan tests van instrumenten op sterrenwachten in het buitenland
- in samenwerking met de andere technische en wetenschappelijke staf van de werkgroep participeren in research en ontwikkelingswerk voor nieuwe instrumenten
- onderhouden van contacten met fijnmechanische, optische en elektronische afdelingen binnen de rijksuniversiteiten in Groningen en Leiden en met leveranciers en afnemers in binnen- en buitenland.

Vereisten:

- HBO niveau (richting fijn-mechanische techniek of werktuigbouwkunde)
- ruime praktijkervaring, ook op organisatorisch gebied
- goede beheersing van het Engels, dan wel bereidheid zich deze kennis eigen te maken.

Salaris, afhankelijk van opleiding en ervaring, tot maximaal f 4724,- bruto per maand.

Opmerkingen:

Datum indieninstreding: zo spoedig mogelijk.

Nadere inlichtingen kunnen worden ingewonnen bij Prof. Dr. H.R. Butcher of bij Dr. J.W. Pel, telefoon 05908-19631.



**UNIVERSITEIT
GRONINGEN**

Richt uw sollicitatie vergezeld van een curriculum vitae, vóór 1 september a.s. aan het hoofd van de afdeling Personele Zaken van de Universiteit Groningen, Postbus 72, 9700 AB Groningen. Vermeld het betreffende vacaturnummer op uw brief en de envelop. Graag zien wij op onze vacatures ook vrouwen solliciteren, vooral voor functies waarin zij thans ondervertegenwoordigd zijn.

Algemene inlichtingen worden graag verstrekt door Karin Kaagman en Truida Olinga van de afdeling Personele Zaken, telefoon 050-635353.

WERKEN AAN DE GRENZEN VAN HET WETEN

NATUUR '88 & TECHNIEK

Losse nummers:
f 10,00 of 200 F.

Bij de omslag



De NMR-spinafbeeldingstechniek is in korte tijd een belangrijk hulpmiddel bij de medische diagnostiek geworden. De techniek maakt het mogelijk om structuren binnen het lichaam zichtbaar te maken, zonder gebruik te maken van ioniserende straling. Hoe deze afbeeldingen tot stand komen leest u op pag. 614 e.v. (Foto: Philips, Eindhoven).

Hoofdredacteur: Th.J.M. Martens.

Adj. hoofdredacteur: Dr G.M.N. Verschuuren.

Redactie: Drs H.E.A. Dassen, Drs W.G.M. Köhler, Drs T.J. Kortbeek.

Secretaris: R. van Eck.

Redactiesecretaresse: T. Habets-Oldé Juninck.

Redactiemedewerkers: A. de Kool, Drs J.C.J. Masschelein, Drs C.F.M. de Roos, Ir S. Rozendaal, Dr J. Willems.

Wetenschappelijke correspondenten: Ir J.D. van der Baan, Dr P. Bentvelzen, Dr W. Bijleveld, Dr E. Dekker, Drs C. Floor, Dr L.A.M. v.d. Heijden, Ir F. Van Hulle, Dr F.P. Israel, Drs J.A. Jasperse, Dr D. De Keukeleire, Dr F.W. van Leeuwen, Ir T. Luyendijk, Dr P. Mombaerts, Dr C.M.E. Otten, Ir A.K.S. Polderman, Dr J.F.M. Post, R.J. Querido, Dr A.F.J. v. Raan, Dr A.R. Ritsema, Dr M. Sluysers, Dr J.H. Stel, J.A.B. Verduijn, Prof dr J.T.F. Zimmerman.

Redactie Adviesraad: Prof dr W. J. van Doorenmaalen, Prof dr W. Fiers, Prof dr H. van der Laan, Prof dr ir A. Rörsch, Prof dr R. T. Van de Walle, Prof dr F. Van Noten.

De Redactie Adviesraad heeft de taak de redactie van Natuur en Techniek in algemene zin te adviseren en draagt geen verantwoordelijkheid voor afzonderlijke artikelen.

Grafische vormgeving: H. Beurskens, J. Pohlen, M. Verreijt.

Druk.: VALKENBURG OFFSET b.v., Echt (L.). Tel.: 04754-1223*.

Redactie en administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland: Postbus 415, 6200 AK Maastricht. Tel.: 043-254044*.

Voor België: Tervurenlaan 32, 1040-Brussel. Tel.: 00-3143254044

EURO
ARTIKEL



Artikelen met nevenstaand vignet resulteren uit het EURO-artikelen project, waarin NATUUR EN TECHNIEK samenwerkt met ENDEAVOUR (GB), LA RECHERCHE (F), BILD DER WISSENSCHAFT (D), SCIENZA E TECNICA (I), TECHNOLOGY IRELAND (EI), PERISCOPIO TIS EPISTIMIS (GR) en MUNDO SCIENTIFICO (E), met de steun van de Commissie van de Europese Gemeenschappen.

Gehele of gedeeltelijke overname van artikelen en illustraties in deze uitgave (ook voor publikaties in het buitenland) mag uitsluitend geschieden met schriftelijke toestemming van de uitgever en de auteur(s).

Een uitgave van

ISSN 0028-1093



Centrale uitgeverij en adviesbureau b.v.

INHOUD

AUTEURS

IV

HOOFDARTIKEL
Gezondheid

613

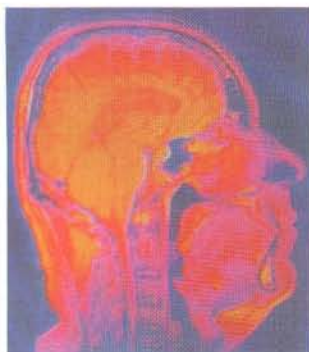
BEELDEN UIT HET BINNENSTE

614

NMR voor medische toepassingen

P.R. Luyten

"...Of we ooit naar het ziekenhuis zullen gaan om NMR-foto's te laten maken, is nog lang niet zeker." Bijna tien jaar geleden was dit de slotzin van een artikel voor kernspinnagnetische resonantie in *Natuur en Techniek*. De auteur van toen kon nog niet bevroeden dat NMR-spinafbeelding zich binnen tien jaar een niet meer weg te denken plaats in de medische diagnostiek zou veroveren. Wereldwijd staan er momenteel ongeveer 1300 NMR-scanners opgesteld, waarvan elf in Nederland en België. Zij bieden artsen een unieke kijk in het binnenste van de mens.



AERODYNAMICA IN VOGELVLUCHT

626

J.J. Videler

Bij de eerste pogingen die mensen ondernamen om te vliegen, maakten ze vleugels vast aan hun armen, gingen op een heuvel staan en renden klapwiekend naar beneden. Pogingen om op deze manier de vlucht van vogels te imiteren mislukten zonder uitzondering. Erg verwonderlijk is dat niet. De bestudering van het vliegapparaat van vogels heeft waardevolle kennis voor de bouw van vliegende machines opgeleverd, maar de finesses van de aerodynamica van vogels zijn nog maar slecht bekend. Niettemin bestaat er een aantal bruikbare modellen.



METEN IN BEELDEN

638

R.J. Ekkers

Een computer die kan zien, die de wereld om zich heen kan bekijken en globaal begrijpt wat er gebeurt, dat is een aantrekkelijke gedachte. Zo'n computer kan voorwerpen herkennen en uitzoeken. De praktijk is tot nu toe minder mooi. Weliswaar is de aansluiting tussen de computer en de camera te realiseren, maar bij de verwerking van de beelden blijkt het moeilijk het interpreterend vermogen van de mens te benaderen. Het probleem is om programma's te maken die de computer in staat stellen mensen of dingen te herkennen.



NATUUR '88 & TECHNIEK

augustus/ 56^e jaargang/1988



DE GEHEIMEN VAN CHEOPS

650

Zwaartekrachtvariaties verraden onontdekte ruimten

J.E. Vermeulen

De Egyptische piramiden zijn omgeven door een waas van geheimzinnigheid. De bouwers en hun opdrachtgevers hebben het geheim van de precieze constructie meegenomen in hun graf. Archeologen, en vóór hen vaak grafschenners, hebben zich er toegang verschaft, maar hebben zij wel alles gevonden wat er te vinden is? De grootste piramide, die van farao Cheops bij Gizeh, een voorstad van Cairo, wordt momenteel met de meest moderne apparatuur onderzocht om te zien of er nog onontdekte ruimten zijn. Onder archeologen woedt een goudkoorts.



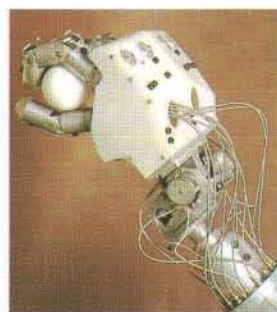
ERFELIJKHEID EN MILIEU

662

Een onafscheidelijke tweeling

D.I. Boomsma, W.M.A. Bressers, A.W. Eriksson en J.F. Orlebeke

Jaarlijks worden in Nederland zo'n 2000 en in België ongeveer 1100 tweelingparen geboren. Wie krijgt een tweeling en hoe komt dat? Voor twee-eiige tweelingen zijn die vragen enigszins te beantwoorden, voor een-eiige niet. Wetenschappers zijn vaak in tweelingen geïnteresseerd. Voor veel eigenschappen kan een vergelijking van een-eiige tweelingen een indicatie geven voor de mate waarin erfelijke factoren een rol spelen. Om een precieze schatting hiervan te krijgen worden in veel onderzoeken een-eiige en twee-eiige tweelingen vergeleken.



METALLEN MET VORMGEHEUGEN

674

J. Van Humbeeck

Temperatuursveranderingen van slechts enkele tientallen graden doen bepaalde metaallegeringen van vorm veranderen. Tijdens de verandering van de koude naar de warme vorm kunnen deze metalen krachten uitoefenen en dus arbeid leveren. Het zal niet verbazen dat metalen met deze wonderlijke eigenschappen tot de hi-tech gerekend worden en veel aandacht krijgen in universitaire en industriële laboratoria. De metalen staan inmiddels bekend als vormgeheugenmetalen en ze verschijnen meer en meer in de industriële en huishoudelijke omgeving.

ANALYSE EN KATALYSE

686

Vechten om een bot/Een biotechnologische perestrojka

PRIJSVRAAG/TESTVRAGEN

694

Cahiers Bio-wetenschappen en Maatschappij

Voedsel- conservering

Het gebruik van straling als middel om voedsel te conserveren en ziektekiemen te elimineren, staat de laatste tijd weer volop in de belangstelling. Met het steeds vaker voorkomen van voedselvergiftigingen, zijn maatregelen dringend geboden. Wat zijn de voor- en nadelen van doorstraling en hoe denken betrokkenen als consumentenorganisaties, de voedingsmiddelenindustrie en de overheid erover?

Een greep uit de inhoud:

Voedselconservering

H. Labots

Besmetting van ons voedsel

H.J. Beckers

Toelatingsbeleid in Nederland

R.M. Ulmann

Voedseldoorstraling in mondiaal perspectief

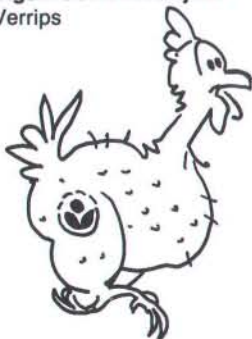
J. Farkas

Consumentenbond: alert blijven

G.J.P. Huis in 't Veld

Toepassing door voedingsmiddelenbedrijven

C.T. Verrips



Het cahier VOEDSELCONSERVERING kan besteld worden bij Natuur en Techniek, Postbus 415, 6200 AK Maastricht, tel. 043-254044, vanuit België: 00-3143254044. Het kost f 7,50 of 145 F (excl. verzendkosten).

AUTEURS

Dr P.R. Luyten ('NMR') is op 4 juni 1954 in Den Haag geboren. Hij studeerde fysische chemie aan de Vrije Universiteit in Amsterdam, waar hij in 1984 promoveerde. Sindsdien is hij werkzaam als researchmedewerker magnetische resonantie bij Philips Medical Systems in Best.

Dr J.J. Videler ('Vogels') is geboren in Heerlen op 1 april 1941. Hij studeerde biologie aan de Universiteit van Amsterdam. In 1969 trad hij in dienst van het Biologisch Centrum van de RU te Groningen. Hij promoveerde in 1975.

R.J. Ekkers ('Metten in beelden') is op 11 december 1944 in Den Haag geboren. Hij behaalde in 1975 het diploma Hoger Elektronicus PBNA. In 1979 trad hij in dienst van de faculteit Technische Natuurkunde van de TU Delft.

Drs J.E. Vermeulen ('Cheops') is geboren in Den Haag op 21 augustus 1956. Hij studeerde theologie en Egyptische talen en culturen aan de Universiteit van Amsterdam van 1977 tot 1985. Van 1986 tot 1987 was hij waarnemend directeur van het Nederlands Instituut voor Archeologie en Arabische Studïen in Cairo.

Drs D.I. Boomsma ('Tweelingen') is op 18 december 1957 in Huizen geboren. Zij studeerde psychologie aan de Vrije Universiteit in Amsterdam en gedragsgenetica aan de University of Colorado in Boulder. Sinds 1985 is zij wetenschappelijk medewerker fysiologische psychologie.

Mw. W.M.A. Bressers ('Tweelingen') is geboren in Eindhoven op 30 april 1963. Sinds 1983 studeert zij biologie aan de Vrije Universiteit te Amsterdam, met als hoofdvak Antropogenetica.

Prof dr A.W. Eriksson ('Tweelingen') is op 7 januari 1927 geboren in Geta (Finland). Hij studeerde geneeskunde aan de Universiteit van Helsinki, waar hij in 1973 promoveerde. In datzelfde jaar werd hij hoogleraar Antropogenetica aan de Vrije Universiteit in Amsterdam.

Prof dr J.F. Orlebeke ('Tweelingen') is geboren in Rotterdam op 27 juli 1937. Hij studeerde psychologie aan de Vrije Universiteit in Amsterdam, waar hij in 1972 promoveerde. In 1980 werd hij benoemd tot hoogleraar Functie- en Methodenleer aan de VU.

Dr ir J. van Humbeeck ('Tweelingen') is op 24 september 1952 in Asse geboren. Hij studeerde metaalkunde aan de KU te Leuven, waar hij in 1983 promoveerde. Thans is hij bevoegd verklaard navorser NFWO aan het Leuvense departement Metaalkunde en Toegepaste Materiaalkunde.

Gezondheid

Er is geen twijfel mogelijk: de NMR-scanner is een nuttig apparaat en het werk dat is verzet om die scanner te ontwikkelen is 'maatschappelijk gericht' in de positiefste betekenis die men zich maar kan denken. Uit het artikel van Luyten (pag. 614) komt naar voren dat er enkele nieuwe diagnostische mogelijkheden zijn ontstaan en dat enkele bestaande mogelijkheden veel veiliger zijn geworden. Desondanks is er aanleiding om even stil te staan bij de plaats die zulke onmiskenbaar gunstige ontwikkelingen in de huidige samenleving hebben. Wanneer immers een NMR-scanner een aantal mogelijkheden biedt, dan is het nauwelijks te verantwoorden die mogelijkheden niet op ruime schaal te gebruiken. Lijden aan een ernstige, ongeneselijke ziekte is erg, maar lijden aan een geneselijke ziekte maar geen toegang krijgen tot de genezing is wreed. Met andere woorden, als zulke apparatuur op de markt is, dan kan men bijna niet anders dan die voor iedereen toegankelijk maken.

Dat hoeft natuurlijk niet te betekenen dat elk dorpskliniekje een NMR-scanner heeft staan, enige specialisatie of concentratie van zulke apparatuur in grote instellingen is goed mogelijk. Maar dan nog: die apparatuur is zeer kostbaar en zoals in alle sectoren van de samenleving nemen de beschikbare budgetten in het beste geval nauwelijks toe.

Het plaatsen van dure apparatuur, en daarbij dan uiteraard ook het aanstellen van eveneens duur gespecialiseerd bedieningspersoneel, betekent in dat verband praktisch altijd het snoeien in andere activiteiten. Dat zou misschien nog zo erg niet zijn als de verschijnselen ziekte, gezondheid en genezing echt goed begrepen werden. Dan zou het mogelijk worden rationeel gefundeerde prioriteiten te stellen.

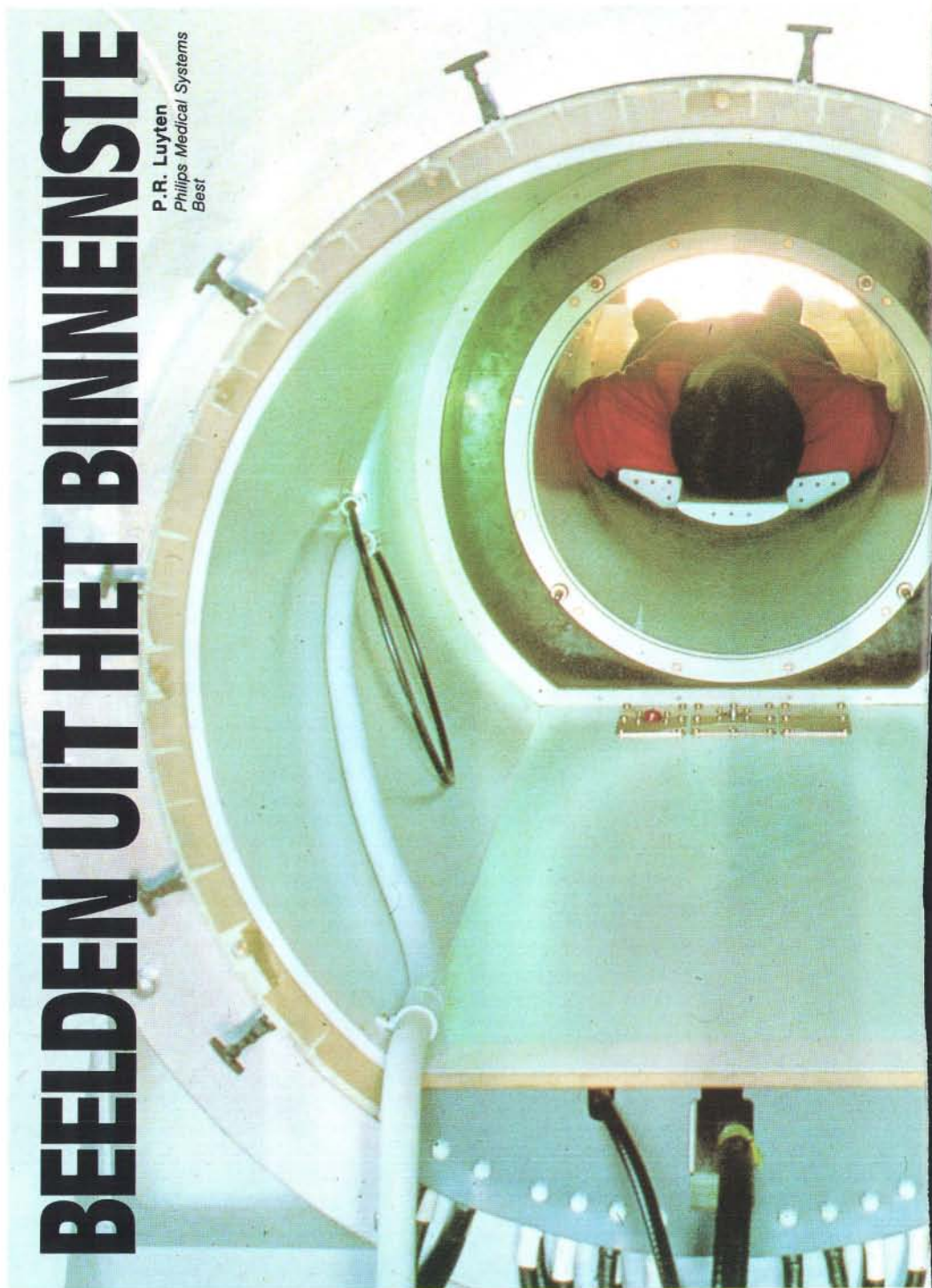
Maar die verschijnselen zijn nog steeds raadselachtig. Waarom kreeg bij de Grote Pest in Londen (1665) 11% van de bevolking de ziekte en dus 89% niet? Voor zover valt na te gaan waren sociologische factoren van weinig invloed en vrijwel iedereen moet een flinke kans op besmetting hebben gehad. Waarom is voor een wetenschappelijke beoordeling van een geneesmiddel of geneeswijze een dubbelblind onderzoek nodig (en het is zonneklaar dat dit nodig is)? Waarom meet men ook bij behoorlijk ernstige ziekten daarbij vrijwel altijd een placebo-effect: ook het nep-geneesmiddel heeft een gunstig effect?

Op deze en veel meer vragen van eenzelfde orde bestaat nog geen hanteerbaar wetenschappelijk antwoord. Dat de experimentator invloed heeft, dat de extra aandacht bij een proef helpt, zijn enkel maar feiten die absoluut niet verklaren waarom een virus zich tegenover de ene verpleegster anders zou gedragen dan tegenover de andere. Op die onduidelijkheid spelen allerlei alternatievelingen in. Niet gehinderd door enige bewijslast kunnen ze op hogepriesterlijke toon orakelen dat ze het allemaal door hebben. En die zekerheid is voor menigeen verleidelijk.

Het zou misschien goed zijn een kleine fractie van het geld dat zal moeten worden uitgetrokken voor de herstructurering van de gezondheidszorg te besteden aan fundamenteel onderzoek dat meer inzicht kan verschaffen in genoemde raadsels. Dat zou de doelmatigheid van de rest van de bestedingen wel eens ingrijpend kunnen verhogen.

BEELDEN UIT HET BINNENSTE

P.R. Luyten
Philips Medical Systems
Best



NMR

voor medische toepassingen

“...Of wij ooit naar het ziekenhuis zullen gaan om NMR-foto's te laten maken, is nog lang niet zeker.”

Bijna tien jaar geleden was dit de slotzin van een artikel over kernspinmagnetische resonantie in *Natuur en Techniek*. Ook de deskundige auteur van toen kon kennelijk niet voorzien dat NMR-spinafbeelding zich binnen tien jaar een niet meer weg te denken plaats in de medische diagnostiek zou veroveren, naast computertomografie met röntgenstraling, proton emissie tomografie en afbeelding met behulp van ultrasound geluid.

Wereldwijd staan momenteel ongeveer 1300 NMR-scanners opgesteld. In Nederland en België zijn het er vier, respectievelijk zeven. Het lage aantal in Nederland komt door het terughoudende beleid van de overheid om deze machines te subsidiëren.

Lange tijd is het voor onmogelijk gehouden een magneet te kunnen bouwen die krachtig genoeg is om NMR-metingen mee te kunnen uitvoeren, met een opening waarin een mens past. Door de toepassing van heliumgekoelde supergeleidenmaterialen is dit nu toch gerealiseerd, hoewel het een erg nauw tunneltje blijft waarin de patiënt of proefpersoon tijdens de meting ligt. De magneet op deze foto is van een experimentele machine met een veldsterkte van 4 Tesla. De NMR-beeldvormers die momenteel in ziekenhuizen zijn opgesteld hebben meestal een maximale veldsterkte van 2 Tesla.

Sinds de ontdekking van röntgenstraling in 1895 is het mogelijk om zonder operatieve ingrepen afbeeldingen te maken van het inwendige van de mens. Vanaf het moment van de eerste primitieve doorlichting tot de dag van vandaag nu moderne röntgenscanners vol op in bedrijf zijn, kreeg de radiologie een steeds belangrijker plaats in de gezondheidszorg. Daarnaast ontstonden er nieuwe technieken. Er zijn nu diagnostische methoden op basis van radionucliden en er zijn er die gebruik maken van ultrasoon geluid. Eén van de spectaculairste ontwikkelingen is evenwel de opkomst van de kernspinresonantie voor medisch gebruik.

Kernspinresonantie of kortweg NMR (nuclear magnetic resonance), is een vlak na de Tweede Wereldoorlog ontwikkelde techniek die tot het midden van de jaren zeventig uitsluitend binnen het fysisch of (bio)chemisch laboratorium in gebruik was. De ontdekking dat NMR in staat is driedimensionale doorlichtingen te maken en bovendien onderscheid kan maken tussen gezond en ziek weefsel, heeft een ongekend nieuw toepassingsgebied voor de kernspinresonantie opgelegd. De NMR-scanner is langzamerhand een onmisbaar medisch instrument, niet alleen voor het vaststellen van anatomische afwijkingen als gevolg van ziekten, maar ook voor het bestuderen van de onderliggende biochemische afwijkingen en de toegepaste therapieën.

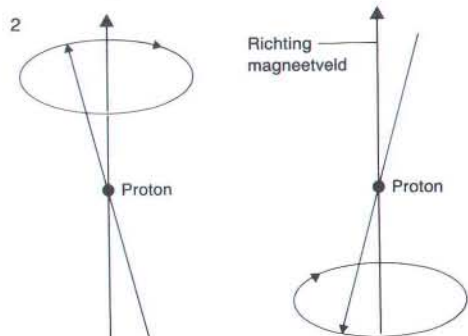
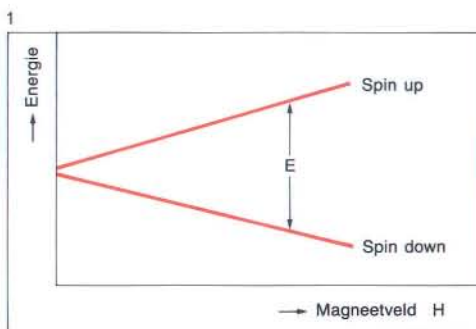
Omklappende spins

NMR berust op het verschijnsel dat protonen en neutronen, de deeltjes waar de atoomkernen uit bestaan, een *kernspin* bezitten. Atoomkernen met een oneven aantal kerndeeltjes be-

zitten een resulterende kernspin; kernen met een even aantal protonen en een even aantal neutronen hebben geen spin. Kernspins kunnen opgevat worden als kleine staafmagneetjes die in een sterk magneetveld een beperkt aantal vaste oriëntaties ten opzichte van de magneetveldrichting kunnen aannemen. Daarmee wijken ze dus af van conventionele magneten, die in een extern veld steeds één positie zullen innemen: hun noordpool naar de zuidpool van het veld gericht. De kernspin is dan ook een quantummechanische eigenschap die niet makkelijk in niet-quantummechanische natuurkundige termen valt te beschrijven.

Een atoomkern met spin die in levende organismen in overvloed voorkomt is de waterstofkern. Levende wezens bestaan immers voor een groot deel uit water en vet, stoffen die beide veel waterstof bevatten. De spin van het waterstofatoom kan in een uitwendig magneetveld twee oriëntaties aannemen: parallel of juist antiparallel aan de veldrichting. In de evenwichtstoestand zullen iets meer protonen zich in de parallelle dan in de antiparallelle toestand bevinden.

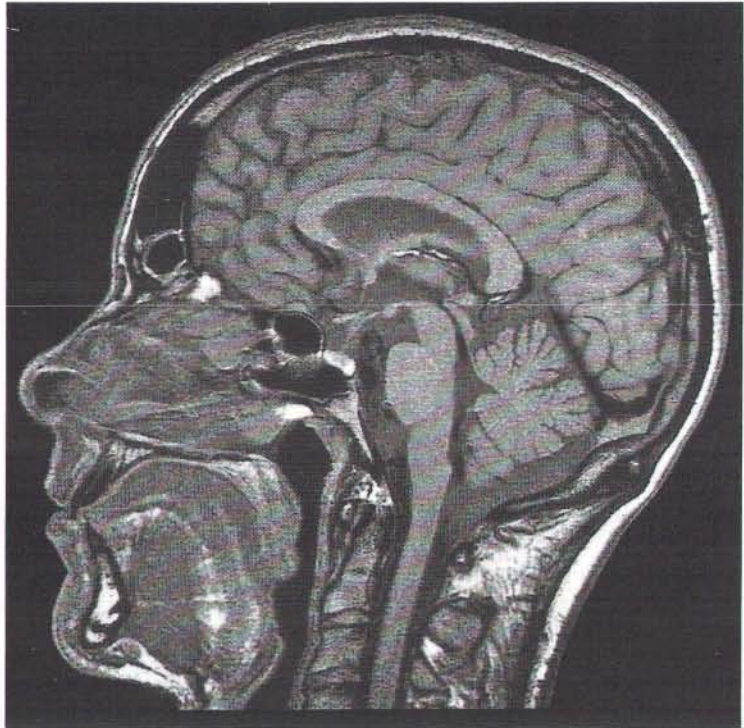
Het principe van de NMR-techniek is nu dat de verdeling tussen parallelle en antiparallelle oriëntaties verstoord kan worden door de spins zoveel energie toe te dienen dat ze van oriëntatie kunnen veranderen. De hoeveelheid energie die voor de overgang van de ene naar de andere toestand nodig is, is afhankelijk van de sterkte van het magneetveld waarin het monster geplaatst is. In de praktijk voert men de energie toe door een korte elektromagnetische puls met de juiste frequentie in te stralen. Gedurende een korte tijd na zo'n puls relaxeren de spins weer naar hun oorspronkelijke toestand terug onder uitzending van energie.



1. Het energieverschil tussen twee spintoestanden van het proton neemt toe in een sterker wordend magneetveld. Het heeft tot consequentie dat het NMR-signaal in een sterk magneetveld ook groter is.

2. De kernspins van protonen precesseren in twee posities onder invloed van een extern aangelegd magneetveld.

3. Een hoofd, opgenomen met het grootste oplosend vermogen dat momenteel haalbaar is. In het zachte weefsel van hersenen en mond-, neus- en keelholte is toch enorm veel contrast te zien. Door de opnametechnieken af te stemmen op de NMR-eigenschappen van protonspins in een bepaald weefseltype, kunnen naast elkaar gelegen organen vaak goed afzonderlijk zichtbaar worden gemaakt.



3

Die wordt gedetecteerd en vormt het NMR-signaal dat na interpretatie waardevolle informatie bevat over de omgeving van de spins in de stof of het lichaam. De frequenties van de benodigde puls en het NMR-signaal zelf liggen in het gebied van de FM radiogolven. Voor proton-spinafbeelding varieert deze bij de tegenwoordig gebruikte magneten tussen de 10 en 100 MHz. Deze zogenaamde resonantiefrequentie is evenredig met de sterkte van de magneet (afb. 1) en met een fysische constante die specifiek is voor elk isotoop, de *gyromagnetische verhouding*.

Een NMR-apparaat bestaat uit een sterke cilindervormige magneet waarin de patiënt geschoven wordt, een zender, een antenne, ontvanger en een krachtige computer om de NMR-signalen in een beeld om te zetten. De meeste NMR-scanners werken tegenwoordig bij een veldsterkte van 0,5 tot 2,0 Tesla. Men gebruikt hiervoor magneten waarvan de spoel supergeleidend is. Het materiaal dat hiervoor gebruikt wordt krijgt zijn supergeleidende eigenschap pas bij extreem lage temperaturen

die bereikt worden door de magneetwindingen in vloeibare helium (4K) te dompelen. Dit vereist speciale constructies, waardoor de magneet tamelijk groot is.

De NMR-techniek heeft met veel radiologische technieken gemeen dat zij gebruik maakt van elektromagnetische straling. Het uiteindelijke resultaat, de spinafbeelding, lijkt bovendien op het eerste gezicht sprekend op een conventionele röntgenfoto. Toch berust NMR op totaal andere principes dan alle andere beeldvormende technieken. In de eerste plaats wordt het NMR-beeld gevormd uit het signaal dat de kernspins zelf uitzenden. Andere radiografische technieken detecteren absorptie of afbuiging van de toegepaste kortgolvlige straling en komen via projectietechnieken tot beeldvorming. De golflengte van de NMR-straling bedraagt echter enkele meters en staat in geen enkele relatie met de uiteindelijke beeldresolutie. De radiofrequente straling die wordt gebruikt, is laagenergetisch en kan in tegenstelling tot andere doorlichtende technieken niet tot stralingsschade leiden.

Spinafbeelding

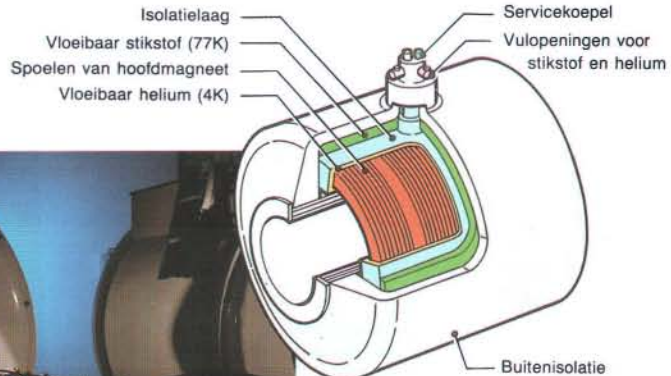
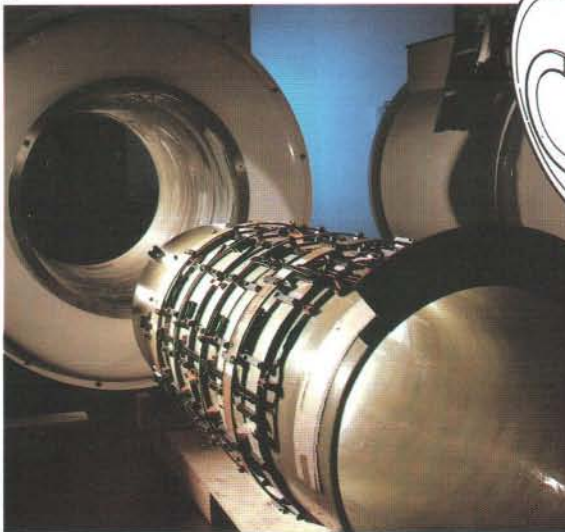
De NMR-spinafbeelding voor medische toepassingen maakt gebruik van het signaal uit de waterstofkernen (of protonen) van water en vet. Aangezien vrijwel alle organen en weefsels voornamelijk uit water en vet bestaan, kan bijna het gehele menselijk lichaam met NMR afgebeeld worden. Doordat de concentraties en de ordening van die stoffen per orgaan verschillen, ontstaan er contrasten, zodat we structuren binnen het lichaam van de patiënt kunnen onderscheiden. Een afbeelding komt tot stand op grond van het principe dat in een gebied binnen de magneetspoel, waar het magneetveld overal even sterk is, de kernspins dezelfde resonantiefrequentie hebben. Door nu niet met een homogeen magneetveld te werken, maar de veldsterkte binnen de spoel gecontroleerd te variëren, resoneren de protonen met een frequentie die aangeeft waar ze zich in de magneet bevinden. Dergelijke (lineaire) magneetveldvariaties noemt men *gradiënten*.

Het NMR-signaal kan ruimtelijk gecodeerd worden door achtereenvolgens drie loodrecht op elkaar staande gradiënten aan te brengen.

Elke spin heeft dan tijdens de meting drie magneetveldsterktes 'gezien'. Het verzamelde NMR-signaal bestaat dan ook uit een zeer groot aantal frequentiecomponenten. De frequenties zijn een maat voor de positie van een spin, terwijl de intensiteit van iedere frequentie informatie geeft over de hoeveelheid spins die ter plekke aanwezig is. De superpositie van verschillende frequenties en intensiteiten kan opgevat worden als een akkoord dat tot stand komt door verschillende toetsen van een piano tegelijkertijd, maar met verschillende kracht aan te slaan. Een geoefende luisteraar kan vrij makkelijk aangeven welke toetsen aangeslagen worden als hij een akkoord hoort. Een NMR-signaal bestaat echter uit een zeer groot aantal verschillende frequentie-componenten, die ook geen harmonisch verband met elkaar hebben, zoals dat in een muziekakkoord wel het geval is.

Voor een uiteindelijke beeldresolutie van 256 x 256 beeldpunten moet het NMR-signaal voor ieder beeldpunt een frequentiecomponent bezitten, die van de andere 65 535 beeldpunten moet kunnen worden afgezonderd. Met een wiskundige techniek, de zogenaamde *Fourier-*

4



5

4, 5 en 6. NMR-spinafbeeldingsapparatuur is opgebouwd uit een grote permanente magneet, in afbeelding 4 op de achtergrond, met daarin een kleiner systeem van elektromagneten waarmee gradiënten kunnen worden aangelegd (afb. 4 voorgrond). Een opengewerkte tekening van de grote magneet (5) laat zien dat de heliumgekoelde magneetspoelen nog omgeven zijn door een koudebuffer van vloeibare stikstof. In een ziekenhuis ziet het er vanuit de controlekamer uit als op afbeelding 6.

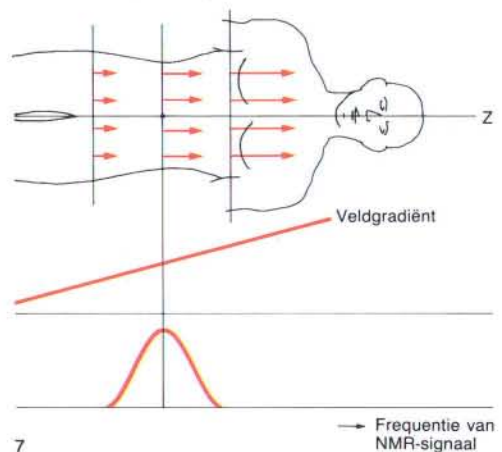


6

transformatie, kan een minicomputer deze klus in luttele seconden klaren. Iedere frequentie correspondeert dan na de transformatie met een beeldpunt met een zekere intensiteit. Door de intensiteiten te vertalen naar bepaalde grijswaarden of kleuren, ontstaat het uiteindelijke NMR-beeld. Ieder punt of pixel (picture-element) in dit beeld correspondeert met het NMR-sigitaal uit een in drie richtingen begrensd volume-elementje van het onderzochte object. Het gebruik van gradiënten maakt het zo mogelijk een afbeelding te construeren van een dunne plak van enkele millimeters doorsnede uit een gedeelte van het lichaam.

Bewegingsgevoeligheid

Het gebruik van gradiënten, die tijdens een meting achtereenvolgens in drie verschillende richtingen worden aangelegd, staat niet toe dat de spins tijdens de meting van plaats veranderen. Hierdoor zou de frequentie van een bepaalde spin tijdens de meting variëren, waardoor een 'bewogen foto' ontstaat. De patiënt,



7

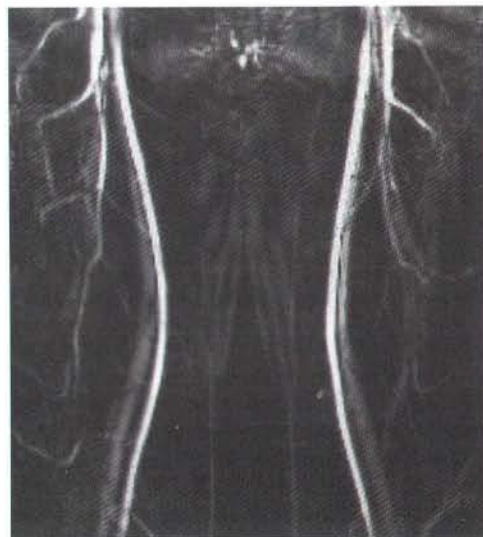
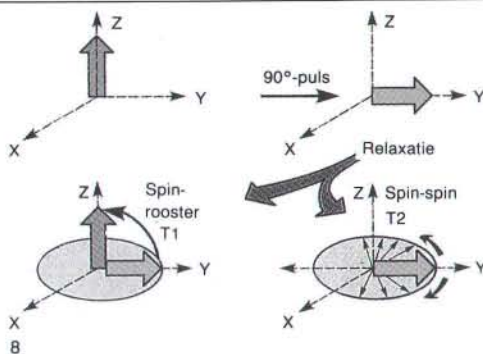
7. Door in één richting een magneetveldgradiënt aan te leggen zullen alleen de protonen in een nauw gedefinieerde schijf binnen een lichaam in resonantie komen, wanneer een veld met bijpassende radiofrequentie wordt ingestraald. Het signaal is dan afkomstig uit een gebied dat met de onderste curve is aangegeven.

waar al die spins uiteindelijk inzitten, moet dus tijdens de meting, variërend van enkele seconden tot tientallen minuten, stilliggen. Voor het afbeelden van sommige lichaamsdelen is dit nog niet voldoende: hartslag en ademhaling leiden tot beeldvervalsingen. Door de meting te synchroniseren met de frequentie van hartslag (ECG-triggering) of ademhaling kunnen veel van deze artefacten onderdrukt worden. Met NMR kunnen redelijke hartafbeeldingen gemaakt worden. Onregelmatige bewegingen, zoals bijvoorbeeld de darmperistaltiek, maken duidelijke NMR-afbeeldingen problematisch. Het afbeelden van hersenen, wervelkolom, gewrichten, ledematen en relatief gefixeerde organen als lever en nieren zijn daarentegen bij uitstek geschikt voor de NMR-techniek.

Contrast en relaxatietijden

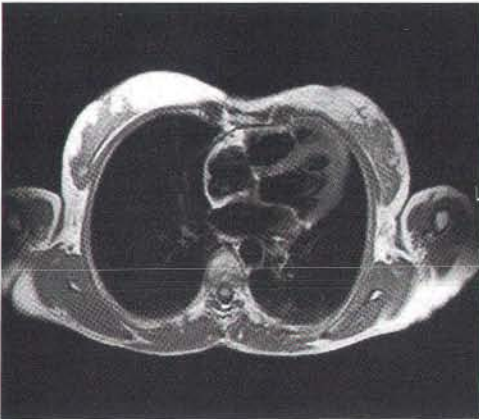
Het contrast, het verschil in grijswaarden tussen de verschillende beeldpunten in een NMR-opname, is een weergave van de verschillen in NMR-signaalsterkten tussen de verschillende beeldpunten. In eerste instantie hangt de signaalsterkte af van de concentratie aan kernspins in het desbetreffende volume-element. De verschillen in protodichtheid tussen verschillende weefseltypen in het menselijk lichaam zijn echter bijzonder klein. Op grond van alleen die concentratieverschillen zou het NMR-beeld weinig relevante informatie verschaffen. Gelukkig hebben de protonspins nog eigenschappen die afhankelijk zijn van hun directe omgeving. Met de NMR-techniek is te onderscheiden of de protonen in water of in vet gebonden zijn, terwijl ook de ordening van de vet- of watermolekulen van belang is. Om deze verschillen in een beter contrast te laten resulteren moet gebruik worden gemaakt van twee typische eigenschappen, de *spinrelaxatietijden* T1 en T2.

Nadat de kernspins door een radiofrequente puls hun evenwichtsoriëntatie hebben verloren, duurt het even voordat alle spins weer naar hun oorspronkelijke situatie zijn teruggekeerd. Dit proces noemen we *relaxatie*, de duur van het proces de *relaxatietijd*. Relaxatie is zichtbaar wanneer we een gespannen snaar tokkelen. De snaar doet er een tijdje (de relaxatietijd) over om terug te keren (te relaxeren) tot zijn rusttoestand.

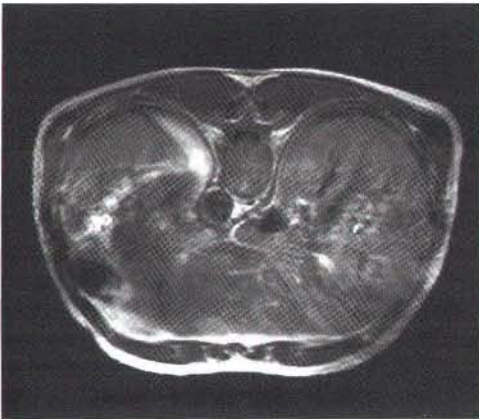


9

Bij spins verloopt het relaxatieproces met een tijdsconstante T1 die sterk afhangt van het type kernspin en de omgeving waarin hij zich bevindt. Molekulen met een grote bewegingsvrijheid, zoals water in bloed of hersenvocht bevatten kernspins met een lange T1. Kernspins in water in de lever worden gekarakteriseerd door een veel kortere T1. Verschillen in T1 komen tot uiting door de radiofrequente pulsen tijdens de NMR-meting zeer snel te herhalen. De spins met een lange T1 krijgen tussen de pulsen onvoldoende tijd om hun evenwicht te hervinden, waardoor hun NMR-signaal steeds zwakker wordt. De spins raken in verzadiging. Dit effect treedt niet op bij spins met een korte T1, hun NMR-signaal blijft sterk. De lever geeft onder deze omstandigheden een sterk, helder signaal, terwijl bloed en hersenvocht donker worden afge-



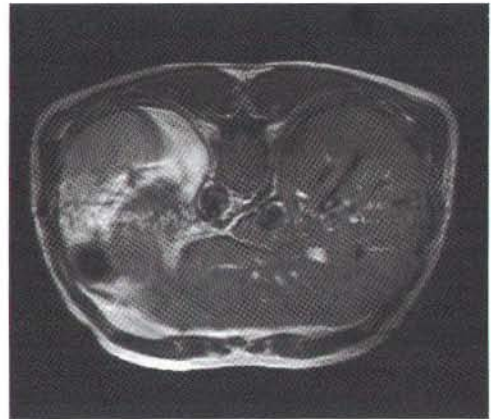
10



11

8. Voor het begrijpen van het verschil tussen de relaxatietijden T1 en T2 is het nodig om te weten dat de magnetisatie door een radiofrequente puls ook 90° gedraaid kan worden. T1 is dan de snelheid waarmee de magnetisatie terugkeert naar de oorspronkelijke z-richting. T2 wordt bepaald door de snelheid waarmee de elektronenspins als gevolg van elektromagnetische interactie met elkaar minder coherent worden. Daardoor gaan ze met verschillende snelheid in het xy-vlak draaien en neemt de resulterende magnetisatie af.

9, 10, 11 en 12. Tijdens een meting moet een patiënt vaak minutenlang stilliggen om de spins op dezelfde plaats te houden. Opnemen van een NMR-sigitaal in fase met ademhaling of hartslag biedt een oplossing. Bij de opname van bloedvaten in de benen (9) en van het hart (10) is op de hartslagfrequentie getriggerd; de opnamen van de lever tonen het verschil tussen een niet (11) en wel (12) op de ademhalingsfrequentie afgestelde opname.



12

beeld. De andere relaxatietijd (T2) die van belang is voor contrastverbetering, hangt samen met het feit dat het signaal van één beeldpunt afkomstig is van een groot aantal kernspins dat vlak na de radiofrequente puls exact dezelfde frequentie uitzendt. Zodra de spins echter uit evenwicht gebracht zijn, hebben ze een wisselwerking met elkaar, waardoor de resonantiefrequenties uiteen gaan lopen. Het NMR-sigitaal middelt uit waardoor de intensiteit sterk afneemt. De snelheid waarmee deze uitmiddeling plaatsvindt, is bepalend voor T2. Kernspins in bot of andere harde lichaamsdelen hebben een extreem korte T2 waardoor ze nauwelijks signaal leveren. Spierweefsel heeft een relatief korte T2 (zwak signaal), terwijl vet een lange T2 kent (sterk signaal).

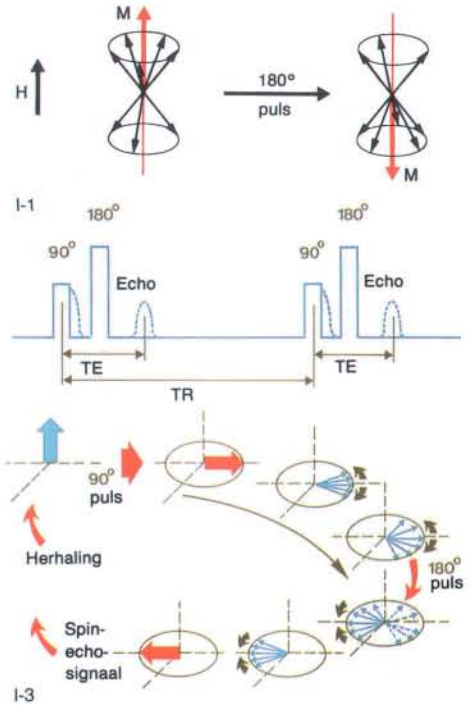
De T1- en T2-waarden voor water en vet maken het mogelijk om binnen acceptabele

meetijden zeer contrastrijke en gedetailleerde NMR-afbeeldingen te maken, waarin de structuren binnen de mens zeer nauwkeurig zichtbaar zijn. Veelal is men echter niet geïnteresseerd in de anatomie, maar is het veel belangrijker om afwijkingen binnen een orgaan of weefselsoort te detecteren. Veel ziekteverschijnselen gaan gepaard met veranderingen in het weefsel op cellulair niveau. Het blijkt dat de T1- en T2-waarden van water in en rond dergelijke cellen sterk kunnen afwijken van de relaxatietijden die in gezond weefsel worden aangetroffen. Hierdoor contrasteert aangetast weefsel met onaangestast weefsel. Het is bijvoorbeeld mogelijk met NMR tumoren, bloedingen, infarcten en multiple sclerose in de hersenen te detecteren. Op de spinafbeeldingstechniek wordt verder ingegaan in het intermezzo.

Het spinafbeeldingsexperiment

In de evenwichtstoestand, waarin meer kernspins een parallelle dan een antiparallelle oriëntatie hebben, resulteren de bijdragen van alle spins in een magnetisatie die in dezelfde richting als die van het magneetveld ligt. Door kort in te stralen met een resonantie-opwekkend radiofrequent veld worden spins van oriëntatie veranderd, ze klappen om. Wordt daarbij de bezetting geheel omgedraaid, dan spreekt men van een *180-gradenpuls*. De resulterende magnetisatie is dan omgeklapt en wijst in tegengestelde richting van het magneetveld. Geeft men een *180-gradenpuls* maar voor de halve tijd, dan spreekt men van een *90-gradenpuls*. Na zo'n puls staat de resultante van de magnetisatie in een vlak (het transversale vlak) loodrecht op de magneetveldrichting. De resultante magnetisatie draait nu met de resonantiefrequentie rond in het transversale vlak, waardoor een signaaltje in de NMR-ontvanger opgewekt wordt. Nu zijn de resonantiefrequenties van een groep bij elkaar liggende spins wel bijna, maar niet helemaal gelijk. Door kleine frequentieverschillen draaien de spins niet even hard in het transversale vlak en zal de resulterende magnetisatie na een 90-gradenpuls snel uitmiddelen. Deze uitmiddeling kan ongedaan worden gemaakt door op het tijdstip $TE/2$ na het ontstaan van de magnetisatie in het transversale vlak een 180-gradenpuls te geven. De frequentieverschillen blijven daarbij bestaan en omdat de spins als het ware terugdraaien naar hun uitgangspositie, keert na weer een tijd $TE/2$ de resulterende magnetisatie weer terug. Het opnieuw gebundelde signaal vormt een echo die door de NMR-ontvanger gedetecteerd wordt. De

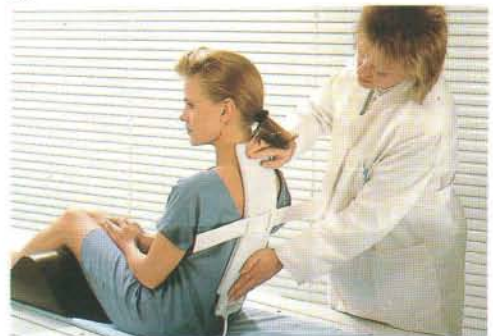
techniek die hiervan gebruik maakt noemt men de *spin-echotechniek*. Bijzonder hieraan is, dat in de tijd waarin de magnetisatie transversaal is, men aan ieder punt in het magneetveld een specifieke resonantiefrequentie kan geven door gedurende korte tijd een gradiënt aan te leggen. Hierdoor bevat het echosignaal de frequentie-infor-

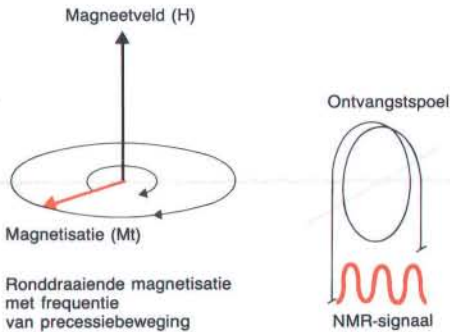


Veiligheid

Vanuit veiligheidsoogpunt biedt de NMR-techniek boven de conventionele beeldvormende röntgentechnieken het voordeel van de veel geringere stralingsbelasting. Van de elektromagnetische straling in het Megahertzgebied, waarmee het NMR-signaal opgewekt wordt, gaat geen ioniserende werking uit. Met experimenten op celkweken en dieren is men er niet in geslaagd enige afwijkingen in de stofwisseling of genetische samenstelling aan te tonen

13





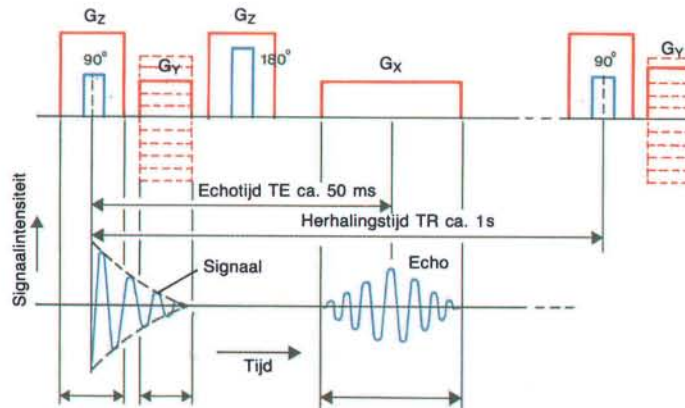
I-2

matie, waardoor de ruimtelijke afbeelding geconstrueerd kan worden. In de praktijk selecteert men meestal een of meerdere plakken door een combinatie van 90- en 180-gradenpulsen, die een beperkte bandbreedte hebben en een selectiegradiënt in de richting loodrecht op de plak. De frequentiecodering van de transversale magnetisatie geschiedt via gradiënten in de twee andere loodrechte richtingen. Men spreekt wel van een 2D opname. Vindt de ruimtelijke codering geheel plaats door frequentiecodering van de transversale magnetisatie, dan spreekt men van 3D. Het contrast kan worden beïnvloed door een verstandige keuze van de echotijd TE en de repetitietijd TR waarmee de verstoringspulsen herhaald worden.

I-1 en 2. Door een 180°-puls wordt de magnetisatie helemaal omgeklapt. Een 90°-puls zorgt ervoor dat de magnetisatie loodrecht op het magneetveld rondraait en te detecteren is.

I-3. Het principe van spin-echo waarbij het effect van T2-relaxatie wordt omgekeerd en de oorspronkelijke magnetisatie terugkeert.

I-4. Een afwisseling van gradiënten en radiofrequente pulsen zorgt voor een goede opname.



I-4

14



13 en 14. Om detailopnamen van bijvoorbeeld de ruggegraat (13) te maken zijn speciale ontvangstspoelen ontwikkeld. Het magneetveld en de radiofrequente puls worden dan door de vaste apparatuur geleverd, het signaal wordt echter opgevangen door de plaatselijk aangebrachte spoel, wat een belangrijke detailverbetering geeft. Afbeeldingen 15 en 16 op de volgende bladzijden zijn met zulke oppervlaktespoelen opgenomen. De spoel voor het hoofd (14) wordt niet alleen als ontvanger, maar ook als zender voor de radiogolven gebruikt. Dit levert een beter signaal op omdat het hoofd een kleinere omtrek heeft dan de rest van het lichaam, waar de opening van de magneet op is gebouwd.

onder invloed van het radiofrequente veld. Evenmin zijn er blijvend nadelige effecten bekend ten gevolge van het verblijf in magneetvelden van de sterkte zoals die in de NMR-beeldvorming worden gebruikt. Het intense radiofrequente veld kan wel aanleiding geven tot ongewenste opwarmingseffecten. Met name bij hogere frequenties (> 50 MHz) zijn de piekvermogens hoog genoeg om weefsel flink op te warmen. Deze verhitting vindt op dezelfde manier plaats als in magnetronovens. Tijdens een meting zendt het radiofrequente veld echter niet continu, de meeste tijd gaat heen met het instellen van de gradiënten en het gelegenheid geven aan de spins om hun evenwicht te hervinden. Hierdoor blijft het gemiddelde vermogen ruim onder de 0,4 Watt per kilogram lichaamsgewicht die als veiligheidsgrens wordt gehanteerd. Om eventuele plaatselijke opwarming van slecht doorbloede organen (ogen, testikels) te voorkomen geldt dat lokaal het geabsorbeerde vermogen nergens de $2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ mag overschrijden.

Een heel ander gevaar vormen de enorme krachten waarmee metalen voorwerpen door de magneet aangetrokken worden. Door de grote magneetopening van 90 cm diameter is het strooiveld van de magneet zeer aanzienlijk.

Dit vereist grote zorgvuldigheid in het weren van zware metalen voorwerpen in de directe nabijheid van de magneet. Draggers van pacemakers mogen in het geheel niet in de buurt van de magneet komen.

Andere kernen

Naast het proton komen ook nog andere kernen in aanmerking voor NMR-beeldvorming. Fluor (^{19}F) beschikt evenals het proton (^1H) over een relatief sterk NMR-signaal. Fluor zit in het lichaam echter alleen in tanden en boten. Afbeeldingen komen tot stand door fluorhoudende verbindingen toe te dienen. In dierexperimenten is het mogelijk gebleken fluorhoudende medicijnen in het lichaam te lokaliseren. Hiermee kan bestudeerd worden hoe bepaalde geneesmiddelen door het lichaam opgenomen worden en waar ze terechtkomen. Er bestaan zelfs geperfluorideerde verbindingen (perfluorotributylamine of perfluorotetrahydrofuraan) die dienst kunnen doen als kunstmatig bloed. Omdat de rest van het lichaam geen fluor-achtergrondsignaal bevat, kan zo het vaatstelsel worden afgebeeld.

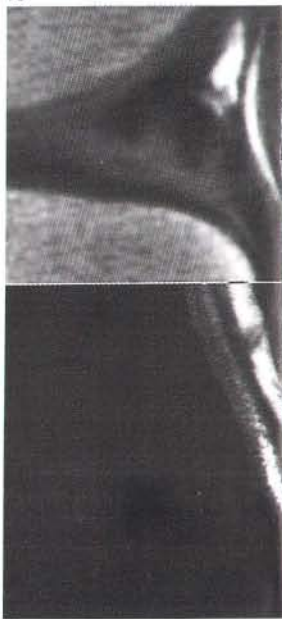
Natrium (^{23}Na) wordt wel in redelijk hoge concentraties in het lichaam aangetroffen,

15



15 en 16. Beelden van een getransplanteerde nier (15) en het zijaanzicht van een knie met een beschadigde buitenmeniscus (16). Beide beelden zijn opgenomen met oppervlaktespoelen zoals er op afbeelding 13 één is te zien. Het detail dat hiermee bereikbaar is, is te zien op de inzet van afbeelding 16.

16



maar geeft per kernspin een veel zwakker NMR-signaal. Natriumbeelden van de hersenen die zijn opgenomen bij velden van 1,5 Tesla of hoger kunnen gebruikt worden voor het detecteren van tumoren en infarcten. De signaalintensiteit in dergelijke beelden blijft echter vrij marginaal, waardoor de beeldvorming op grond van het natrium-NMR-signaal nog slechts in een enkel geval tot praktische toepassingen heeft geleid.

Toekomstige toepassingen

Een veelbelovende toepassing van de spinafbeeldingstechniek die nog gedetailleerder bestudering van levende objecten mogelijk maakt is de zogenaamde NMR-microscopie. Sterkere magneten en sneller verlopende gradiënten kunnen de resolutie van het spinafbeeldingsexperiment nog sterk verbeteren. Inmiddels is het mogelijk gebleken NMR-afbeeldingen te maken van één enkele cel, waarbij het ruimtelijk oplossend vermogen in het vlak van de afbeelding 10 bij 13 micron bedraagt. Hiermee kunnen biochemische processen op microscopische schaal gevolgd worden, zonder enige storende effecten te introduceren. Dergelijke experimenten worden uitgevoerd met

NMR-instrumenten waarvan de magneetopening slechts enkele centimeters bedraagt. Met magneetvelden die toepassingen op mensen toelaten is al een beeldresolutie van 50 micron gehaald. Dit is voldoende om bepaalde histologische patronen te herkennen. Op deze wijze kan men met NMR bij bepaalde ziektebeelden weefselafwijkingen typeren en het stadium van de aandoening helpen vaststellen zonder dat er een weefselpunctie plaats hoeft te vinden.

Een geheel ander perspectief biedt NMR als techniek voor het afbeelden van bewegende spins. Al eerder is aangegeven dat bewegende spins tot slechte NMR-beelden leiden. Door echter de gradiënten in het NMR-experiment op een bepaalde manier te manipuleren kan een beeld gemaakt worden, waarin alleen spins met een bepaalde snelheid of versnelling zichtbaar zijn. Hiermee kunnen bijvoorbeeld bloedvaten in beeld gebracht worden; de techniek staat bekend als NMR-angiografie.

Dergelijke nieuwe ontwikkelingen dragen ertoe bij dat de kernspinresonantie op een steeds breder gebied binnen de medische diagnostiek kan worden ingezet. De verbeterde instrumentatie en de onlangs mogelijk geworden opvoering van de beschikbare magneetsterkte voor menselijke NMR-studies naar 4 Tesla, leiden tot een steeds hogere resolutie en beeldcontrast. Daarnaast dient zich nog een nieuwe toepassing aan, de gelokaliseerde spectroscopie aan mensen. Naast de morfologische informatie die de NMR-scanner in de vorm van een spinafbeelding geeft, kunnen nu ook in detail biochemische processen met behulp van NMR-spectra gevolgd worden. Hiermee grijpt de medische NMR terug naar het oorspronkelijke gebruik van de kernspinresonantie, maar nu in een nieuw jasje.



Literatuur

- Lauterbur PC: Image formation by induced local interactions: examples employing NMR. *Nature* 1973; 242; pag. 190.
 Damadian R. Tumor detection by NMR. *Science* 1971; 171; pag. 1151.
 Aguayo JB et al. Nuclear magnetic resonance imaging of a single cell. *Nature* 1986; 322; pag. 190.

Bronvermelding illustraties

Alle illustraties zijn beschikbaar gesteld via de auteur door Philips Medical Systems in Best.



Wilde zwanen maken vaart in de aanloop naar een vlucht: de voorste is al los van de grond. Het slaan met de vleugels levert de vogels de benodigde draag- en stuwkracht. Bij de neerslag wordt vooral draag-

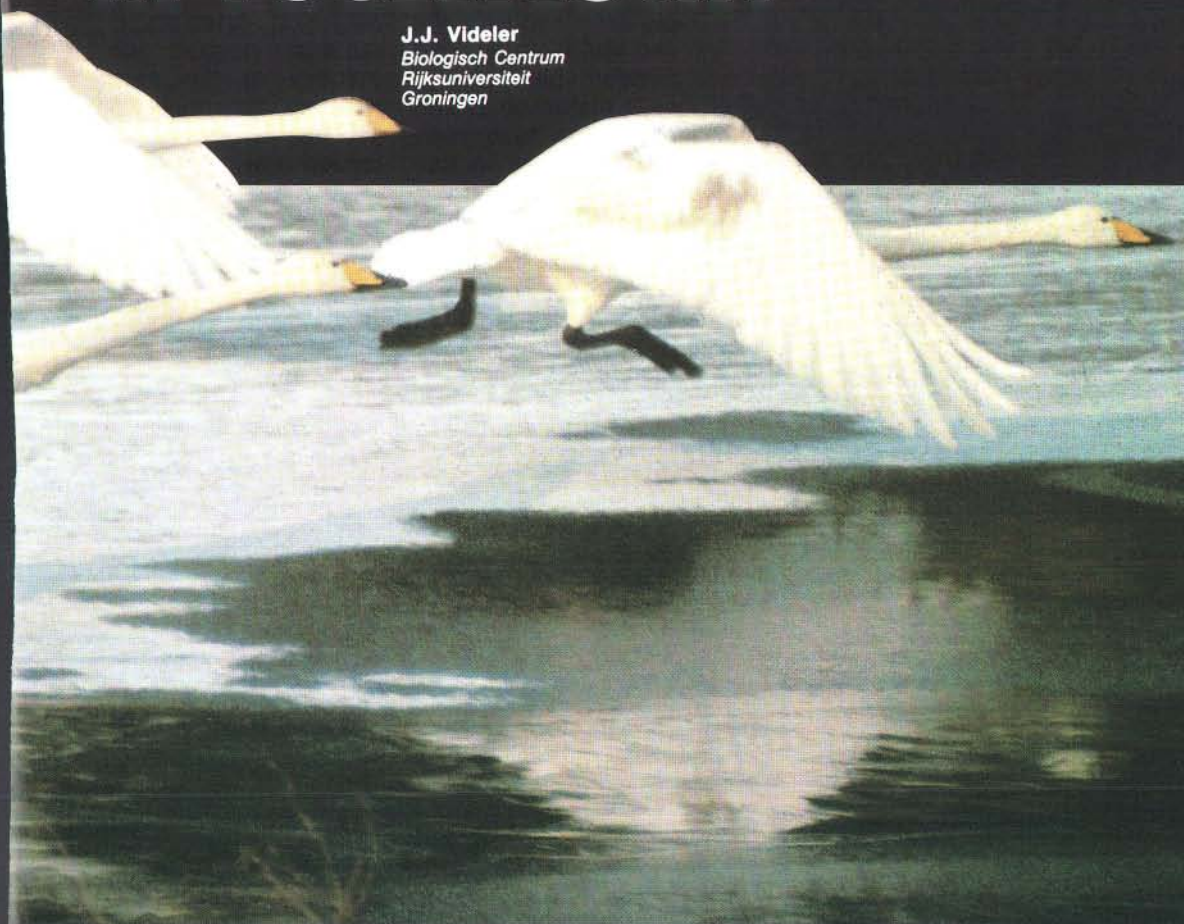
kracht geleverd, bij de opslag stuwkracht. Goed te zien is het verschil tussen de armvleugel en de handvleugel. De laatste is met langere en meer asymmetrische slagpennen bezet.

Bij de eerste pogingen die mensen ondernamen om te vliegen, maakten ze vleugels vast aan hun armen, gingen op een heuvel staan en renden klapwiekend naar beneden. Pogingen om op deze manier de vlucht van vogels te imiteren mislukten zonder uitzondering. Zelfs met inzicht in de aerodyna-

mica zouden deze pioniers vermoedelijk bakzijl gehaald hebben, omdat de eerste theorieën over de aerodynamica van de vogelvlucht pas na 1974 geformuleerd zijn. De experimentele bevestiging is van nog veel recentere datum.

AERO DYNAMICA IN VOGELVLUCHT

J.J. Videler
*Biologisch Centrum
Rijksuniversiteit
Groningen*



De vraag hoe vogels vliegen heeft mensen steeds bezig gehouden. Bestudering van het vliegapparaat en de bewegingen van vogels leverden inzichten op die ons in staat stelden met machines het luchtruim te kiezen. Maar vliegtuigen vliegen met starre vleugels die bij voldoende snelheid voor draagkracht zorgen. De stuwkracht die nodig is om de vliegsnelheid te bereiken en te onderhouden wordt door motoren verzorgd. Bij vogels genereren de vleugels zowel de draagkracht als de stuwkracht. Deze twee functies komen soms met elkaar in conflict en er is nog geen theorie die het vliegen met op en neer slaande vleugels bevredigend verklaart. De aerodynamische principes die worden toegepast bij de bouw van vliegtuigen zijn hooguit op zwevende vogels van toepassing, zoals we verderop nog zullen zien.

Sinds 1974 zijn er globale aerodynamische modellen beschikbaar die het mogelijk maken de krachten te schatten die bij het vliegen op een vogel inwerken. Ze geven inzicht in de energie die het kost om deze krachten te overwinnen. Deze modellen zijn deels op theorie en deels op empirie gebaseerd. Ze voorspellen optimale vliegsnelheden en vlieggkosten bij verschillende snelheden en lichaamsgewichten. Het was echter niet duidelijk hoe dicht deze voorspellingen de werkelijkheid benaderen.

Aan de Rijksuniversiteit Groningen is het nu gelukt om snelheden en het energieverbruik bij vrij vliegende vogels direct te meten. Wilde torenvalken, volgens valkeniersmethoden getraind, vlogen honderden kilometers onder ge-

controleerde omstandigheden in een windstille gang. Vliegsnelheden van vogels zonder en met extra gewicht aan de poten werden tijdens duizenden vluchten over 125 m precies geregistreerd. High-speedopnamen van de vogels op kruissnelheid, tegelijkertijd in zij- en onderaanzicht gefilmd, leverden een precies driedimensionaal beeld op van de slagbeweging. Het energieverbruik bij het vliegen kon op twee manieren direct worden gemeten. De eerste mogelijkheid is het variëren van de vliegafstanden en het tegelijkertijd meten van de dagelijkse energie-opname, gewichtsverandering en energieverbruik. Bij de tweede methode wordt de CO_2 -productie als maat voor het energieverbruik gemeten in perioden met veel en weinig vliegactiviteit. Dit kan worden gedaan door dubbelgelabeld water (D_2^{18}O) te injecteren in de bloedbaan en het concentratieverval te vervolgen van beide stabiele isotopen over de meetperiode.

Vergeleken met de transportkosten van een Boeing 747, die $3,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ bedragen, zijn die van de torenvalk hoog, circa $7,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Ook andere vogels kost het vliegen veel energie en zij hebben dan ook technieken ontwikkeld om energie te besparen (afb. 1 en 2).

Bouw van het vliegapparaat

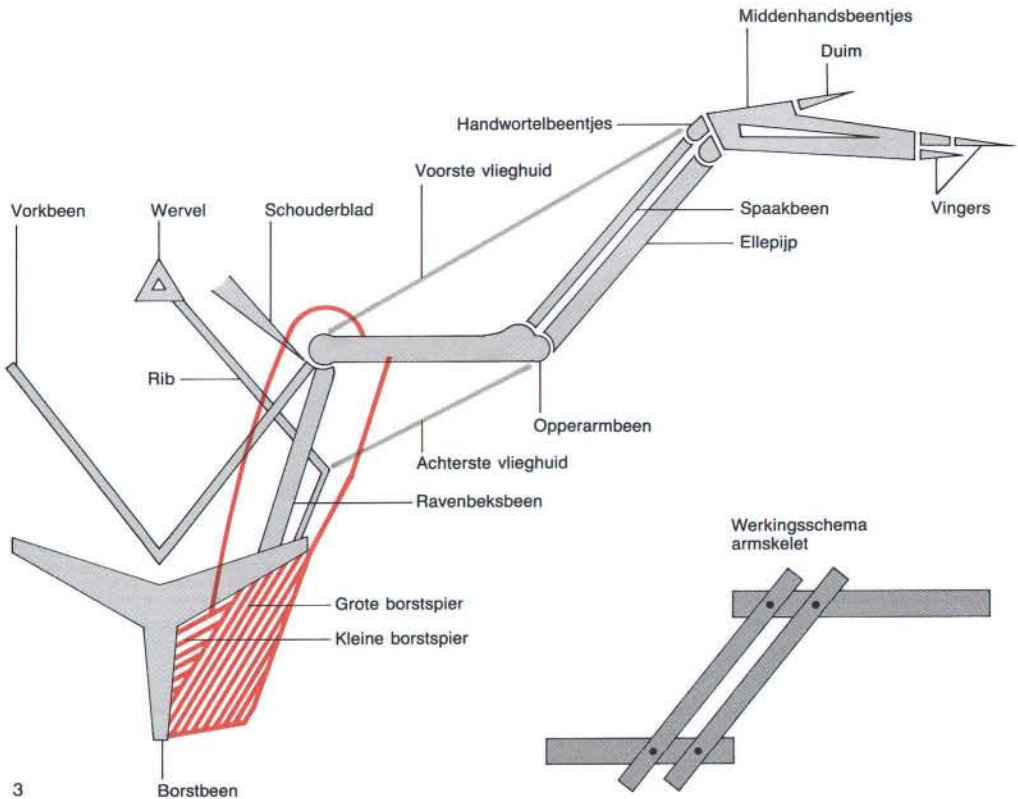
Vleugels dragen het gewicht van de vogel en stuwen hem voort. Ze zijn stevig verbonden met de doosvormige borstkas waarvan het borstbeen met een forse kam voor de aanhech-

1



2





1 en 2. Vogels hebben tal van manieren om tijdens het vliegen energie te sparen. Als het even kan maken ze gebruik van opwaartse luchtstromen en de wind. Een aantal vogels, zoals de kokmeeuw (1) stopt de vleugelslag zodra het kan om te zweven. Kleine vogels als de vink (2) vliegen actief naar beneden, maken vaart, om vervolgens met gesloten vleugels omhoog te schieten.

3. Een schematisch overzicht van de bouw van het vliegapparaat van een vogel en het werkingsschema van het armskelet. De grote borstspier trekt de vleugel aan het oppeerarmbeen omlaag en draait hem tegelijkertijd om de lengte-as naar voren. De kleine borstspier heeft een lange pees over het schoudergewricht en trekt de vleugel naar boven en naar achteren.

ting van vliegspieren, het voorste deel vormt. De totale massa van een vogel bestaat voor een belangrijk deel uit de grote vliegspieren, die van het borstbeen naar het oppeerarmbeen van de vleugel lopen (afb. 3).

Bij het vleugelskelet is het korte stevige oppeerarmbeen via twee scharniergewrichten verbonden met het spaakbeen en de ellepijp van de onderarm. Het handskelet is in vergelijking met dat van de meeste zoogdieren gereduceerd. Er zijn slechts twee handwortelbeentjes, die met spaakbeen en ellepijp scharnieren, en drie vergroeide middenhandsbeentjes. De hand bestaat verder uit één duim en twee vingers, de eerste vinger bevat twee kootjes, de tweede en de duim meestal elk slechts één.

De vier gewrichten die spaakbeen en ellepijp in elleboog en pols vormen, zijn aan elkaar gekoppelde scharnieren: strekt het ellebooggewricht dan gaat automatisch de hand naar voren. Tussen het oppeerarmbeen en de romp zit een kogelgewricht dat verticale en horizontale bewegingen en draaiingen van de vleugel om zijn lengteas toelaat. De kom van het gewricht wordt gevormd door de toppen van ravenbeksbeen en sleutelbeen en door een punt van het schouderblad. Het ravenbeksbeen voorkomt dat het gewricht door de vliegspieren naar het borstbeen wordt getrokken, de tot vorkbeen vergroeide sleutelbeenderen doen dienst als een V-vormige bladveer tussen het linker en rechter gewricht.

De grote borstspier beweegt de vleugel naar beneden en draait die tegelijkertijd om de lengteas naar voren (*pronatie*), want hij is aan de voorzijde van het opperarmbeen aangehecht. De kleine borstspier ligt op het borstbeen onder de grote en is via een pees over de bovenkant van het gewricht, dat als het ware een katrol vormt, verbonden met het opperarmbeen. Deze spier trekt samen met enkele kleinere spieren de vleugel naar boven en draait hem tegelijkertijd naar achteren (*supinatie*).

Het vleugelskelet is bekleed met pezige huidplooien aan de buigzijde van de gewrichten. De achterste vlieghuid zit tussen romp en bovenarm; de voorste verbindt bovenarm, onderarm en hand en vormt de voorrand van de vleugel. De vleugel is globaal te verdelen in een arm- en een handvleugel. Het grootste deel van het vleugeloppervlak bestaat uit dakpansgewijs over elkaar liggende slagpennen. Daarvan zijn de handpennen langer en asymmetrischer van bouw dan de armpennen. De voorrand van de vleugel en de bases van de slagpennen zijn bekleed met dekveren die samen met wat donsveren vorm geven aan het profiel van de vleugel en hem sterk en luchtdicht maken. De veren zijn niet star ingeplant maar kunnen actief worden bewogen en gedraaid.

Vogelvleugels vormen grote sterke oppervlakken die forse loodrechte krachten kunnen weerstaan. Bij op- en neerslag dienen ze steeds actief te worden versneld, daarom zijn ze zeer licht gebouwd.

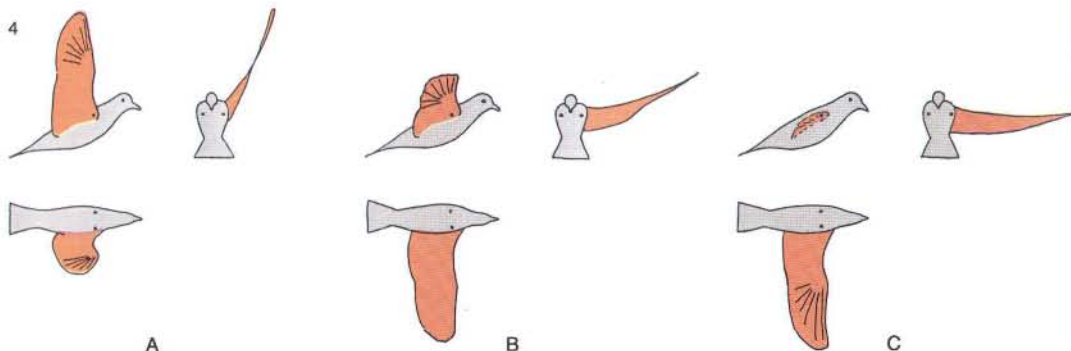
Zweef- en glijvlucht

Om te kunnen vliegen, zal een vogel (en ook een vliegtuig) een draagkracht (*lift*) moeten ontwikkelen die even groot als, maar tegengesteld aan het gewicht is. Om vooruit te kunnen

4. De vleugelbewegingen van een duif in zij-, voor- en onderaanzicht. A tot en met C laten de neerslag zien, D tot en met F de opslag.

5 en 6. De albatros (6) en de gier (5) zijn beide goede zwevers. De albatros maakt gebruik van het feit dat de windsnelheden vlak boven water lager zijn dan hogerop. Bij hoge windsnelheden zweeft hij met de wind mee onder een kleine hoek naar beneden en wint daarbij snelheid. Vlak boven water draait hij met volle snelheid tegen de (zwakkere) wind in en wint dan zoveel mogelijk hoogte, waarna de cyclus zich kan herhalen. De gier daarentegen stijgt met behulp van thermiek, opstijgende warme lucht, om vanaf grote hoogte over lange afstanden naar beneden te glijden naar een volgend gebied met thermiek.

5



vliegen, moet de luchtweerstand worden overwonnen. Voor de starre vleugel van een vliegtuig is goed bekend aan welke eisen een vleugel moet voldoen om voldoende lift te leveren en welke weerstandskrachten hij ondervindt. De lift F_L is evenredig met de dichtheid van de lucht ρ , het vleugeloppervlak A , het kwadraat van de aanstroomsnelheid v van de lucht en de liftcoëfficiënt (C_L):

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 A$$

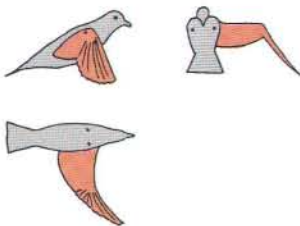
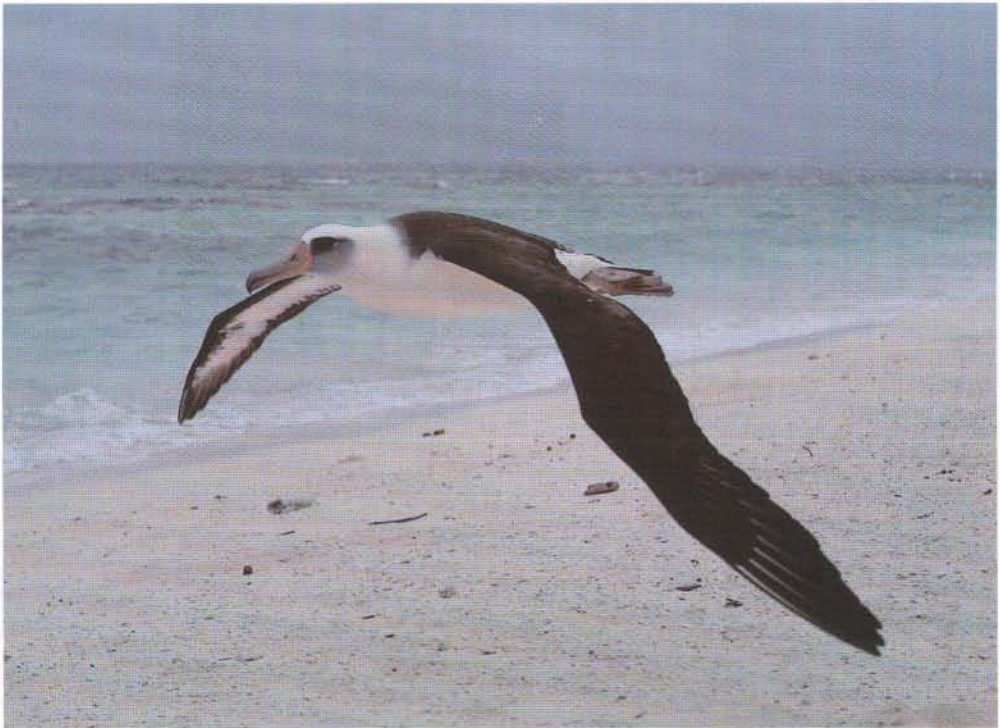
De liftcoëfficiënt neemt toe tot een maximumwaarde wanneer de aanstroomhoek toeneemt en hangt samen met de vorm van het vleugelprofiel op doorsnede.

Voor de vleugelweerstand geldt een analoge formule:

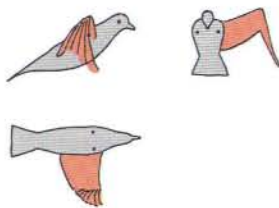
$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A$$

C_D is hierin de weerstandcoëfficiënt. Deze wordt niet alleen groter naarmate de wrijving over het vleugeloppervlak en de romp groter

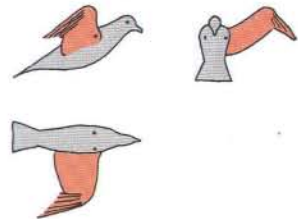
6



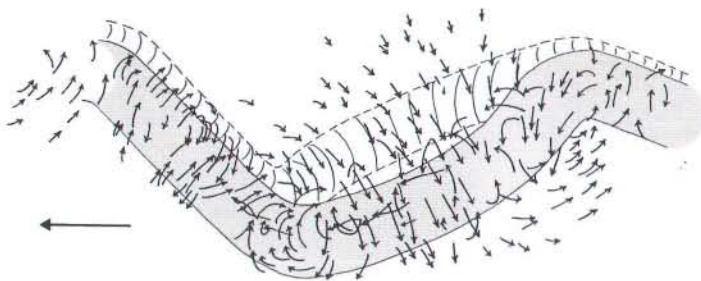
D



E



F



7

is, maar vooral naarmate er meer liftkracht moet worden gegenereerd (door het neerlaten van kleppen bijvoorbeeld).

De maximale grootte van de verhouding tussen C_L en C_D , de *lift-weerstandverhouding*, beschrijft de zweefeigenschappen van vliegtuig en vogel. Zweefvliegtuigen leveren daarbij de beste prestaties met waarden in de buurt van de 35. De best zwevende vogels zijn de albatrossen die met hun smalle lange vleugels wel 24 maal meer lift dan weerstand kunnen opwekken. Gieren zijn ook goede zwevers, ze zijn met een maximale C_L/C_D tussen 20 en 23 beter dan de doorsnee verkeersvliegtuigen, die in de buurt van de 18 uitkomen. Bij torenvalk en duif ligt de liftweerstandverhouding bij respectievelijk 10 en 9. Ze vertegenwoordigen de grote groep vogels die nog wel goed kunnen zweven, maar het toch meer van de actieve slagvlucht moeten hebben.

Hoewel albatros en gier beide goed kunnen zweven, hebben ze totaal verschillende vleugels (afb. 5 en 6). Die van de gier hebben een groot oppervlak met grote spleten tussen de handpennen, de vleugels van de albatros zijn lang en smal. In de aerodynamica kennen we in dit verband het begrip *slankheid*, het kwadraat van de spanwijdte gedeeld door het oppervlak. Die is voor de albatros 20 en voor de gier 7, net zo veel als voor de Boeing 747. Gieren zijn minder goed aangepast aan het zweven dan albatrossen, omdat ze vaak moeten opstijgen vanaf de vlakke grond, korte brede vleugels zijn daarvoor beter geschikt dan lange smalle. Albatrossen gebruiken veelal steile klippen om van te starten en op te landen.

De lift-weerstandverhoudingen van zelfs de beste zwevers onder de vogels zijn niet zo goed als die van zweefvliegtuigen. Daar staat tegen-



8

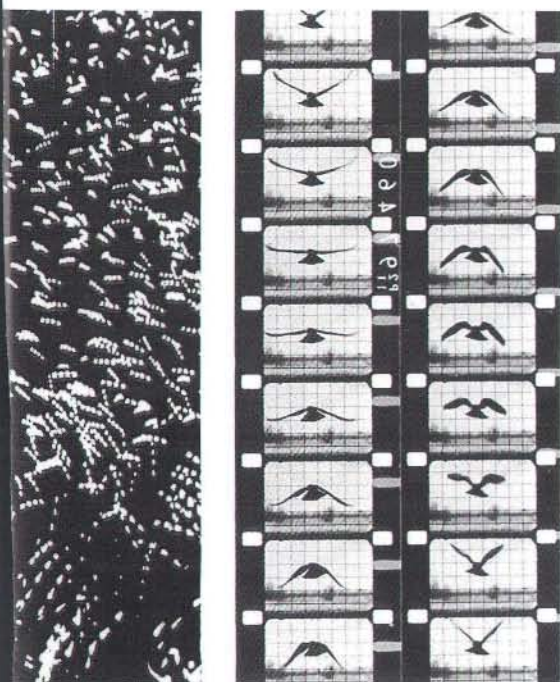
over dat vogels veel meer controle over de aerodynamische eigenschappen van hun vleugels hebben. Ze kunnen zowel de stand als het oppervlak van de vleugels op diverse manieren variëren. Het belangrijkste verschil is echter dat vogels hun vleugels uit kunnen slaan.

Slagvlucht

De vleugelslag levert zowel draagkracht als stuwkracht, doordat massa's lucht naar achteren en naar beneden geslagen worden. Indien

7 en 8. De verplaatsing van luchtmassa's achter een vleugel kan zichtbaar gemaakt worden als een vogel door een ruimte vol heliumgevulde zeepbellen vliegt (8). Bij nadere beschouwing (7) blijken ringvormige luchtwerelingen te ontstaan, waarin de belletjes zich naar achter en naar beneden bewegen. De pijltjes hebben alleen betrekking op de voorste werveling (linkervleugel). De werveling achter de rechtervleugel is met onderbroken lijnen getekend.

9. Filmbeelden van een torenvalk uit het Groningse onderzoek geven een goed beeld van de vliegbewegingen bij het bidden.



9

we die luchtmassa's zichtbaar maken door vogels te laten vliegen door een wolk zeepbelletjes gevuld met helium, dan zien we bij de neerslag van de torenvalk (afb. 8) een ringvormige luchtwereling waarin de belletjes zich naar achter en beneden verplaatsen. Tijdens de opslag krijgt de lucht vooral snelheid in achterwaartse richting. De beelden suggereren dat tijdens de neerslag vooral draagkracht en tijdens de opslag primair stuwkracht gegenereerd wordt. Gelet op de bewegingen van de delen van de vleugel ontstaat het vermoeden dat de

armvleugel de belangrijkste draagkrachtproducent is en dat de handvleugel vooral de stuwkracht voor zijn rekening neemt.

Een vliegtuigvleugel hoeft alleen maar draagkracht te leveren. De aerodynamische werking ontstaat door de opbouw van drukverschillen tussen de bovenzijde en onderzijde van de vleugel. Hoewel star, trillen vliegtuigvleugels altijd enigszins in verticale richting. Indien verticale vleugelbewegingen ten opzichte van de horizontale snelheid extreem groot worden, ontstaan de drukverschillen minder goed of zelfs in het geheel niet. Het begrip *reduced frequency* (σ) beschrijft de verhouding tussen de verticale snelheid en voorwaartse snelheid in de formule:

$$\sigma = \frac{2 \pi f c}{V}$$

waarbij f de frequentie is van de verticale beweging in Hz, c de gemiddelde afstand tussen de voor- en de achterrand van de vleugel (de profielkoorde) en V de horizontale snelheid. Indien σ groter is dan 0,5 zijn stationaire aerodynamische theorieën vrijwel niet meer van toepassing. Bij waarden boven de 0,2 treden er al storende effecten op. Wanneer we deze formule toepassen op de torenvalk (gemiddelde profielkoorde 0,12 m), dan komt σ bij kruissnelheden tussen de 8 en 9 m·s⁻¹ en slagfrequenties van $\pm 5,5$ Hz, dicht in de buurt van die grenswaarde van 0,5. Niet-stationaire effecten zullen dus een belangrijke rol spelen bij de slagvlucht van vogels. Welke effecten dat precies zijn en hoe we die moeten vertalen in een niet-stationair model is nog niet bekend.

Een andere complicerende factor is dat vogels hun vleugels nooit simpel in één vlak op en neer slaan, maar, zoals we al zagen, complexe slagen in de ruimte maken. In zowel zij-, voor- als onderaanzicht beschrijven de vleugeltoppen cirkels ten opzichte van het lichaam. Dat komt omdat de neerslag altijd met pronatie gepaard gaat en de opslag met supinatie. Deze beschrijving is gebaseerd op analyse van high-speedfilms van een torenvalk op kruissnelheid, maar voldoet ook voor de bewegingen van andere vogels. Kleine vogels voeren de bewegingen veel extremer uit en met hogere slagfrequenties, ze slaan de vleugels over een grotere boog verder naar voren en halen de vleugelpunt dicht langs het lichaam omhoog, waarbij hand en ellebooggewricht sterk gebogen zijn.

Bidden en helikoptervlucht

Jagende torenvalken zien we met slaande vleugels stilstaan ten opzichte van de grond. We noemen dit gedrag *bidden*. Ze vliegen tegen de wind in met de snelheid van de wind en houden daarbij hun kop heel stil. Hoe ongelooflijk precies ze dat doen blijkt uit de registratie van verticale en horizontale verplaatsingen van de kop in de tijd gedurende een aantal vleugelslagcycli (afb. 12). Die zijn nooit groter dan ± 6 mm terwijl de windsnelheid sterk fluctueert rond de $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Torenvalken bidden gewoonlijk bij windsnelheden tussen de 3 en $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Bij heel lage windsnelheden bidden ze nog maar heel kort en bij windstilte vertonen ze dit gedrag niet meer, dan moet alle draagkracht actief door de slagbeweging worden geleverd en de energie daarvoor blijken vogels groter dan een spreeuw niet meer te kunnen opbrengen.

Heel kleine vogels kunnen dat wel en kolibries en honingzuigers zijn in de *helikoptervlucht* gespecialiseerd. De lichaamsas staat daarbij schuin naar boven en de vleugels slaan horizontaal. Na de neerslag, die hier naar voren is gericht, klapt de vleugel razend snel om en wordt ondersteboven naar achteren bewogen bij de opslag. De kleinste kolibries halen hierbij slagfrequenties van 90 Hz. Ze werken als ventilatoren die met vleugelslagen een straal lucht naar beneden versnellen.

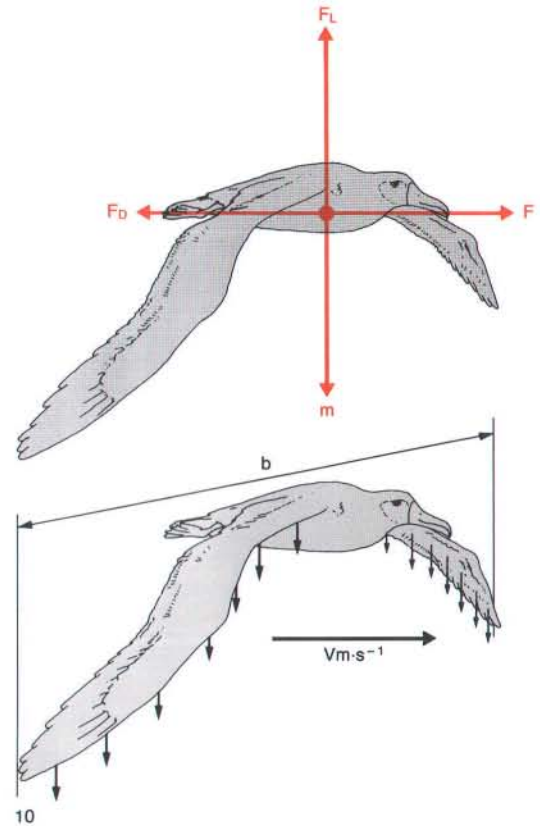
Kosten van het vliegen

We gaan uit van het eenvoudige geval waarbij een vogel die een gewicht W (N) heeft, met eenparige snelheid V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) op een constante hoogte door stilstaande lucht vliegt. Newtons wetten leren dan dat, gemiddeld over de tijd, de totale draagkracht F_L gelijk moet zijn aan W , en dat de totale stuwkracht F_D gelijk moet zijn aan de som van alle horizontale weerstanden op de vogel. In een globale benadering scheiden we de krachten die op de vogel werken in horizontale en verticale krachten en we proberen de energie te schatten die de vogel bij verschillende vliegsnelheden moet leveren om de horizontale weerstandskrachten en de zwaartekracht op te heffen.

We beginnen met de draagkracht (afb. 10). De vogel slaat met zijn vleugels een massa lucht naar beneden. Die massa zal ongeveer

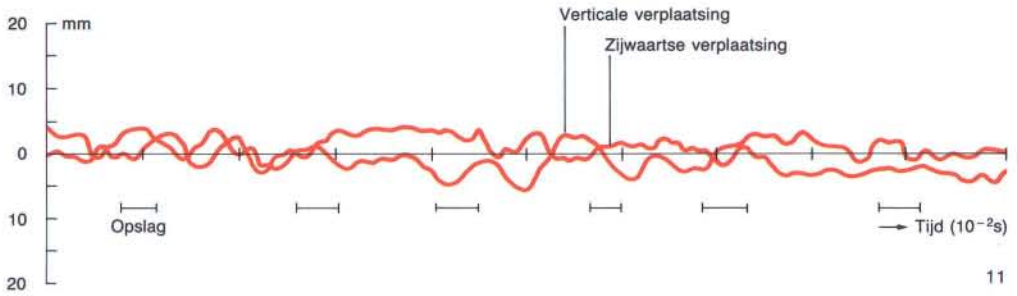
10. De belangrijkste krachten waar een vliegende vogel mee te maken krijgt.

11. Registratie van de kopbewegingen van een biddende torenvalk tijdens een aantal vleugelslagcycli. Aangegeven zijn de bewegingen in verticale en in zijwaartse richting. De bewegingen zijn nooit groter dan 6 mm.



12 en 13. Een biddende bonte ijsvogel lijkt stil in de lucht te hangen omdat hij tegen de wind in vliegt met een snelheid gelijk aan de windsnelheid. Ook een kolibrie die een bloem bezoekt hangt stil in helikoptervlucht. De vogel hangt bijna verticaal en de vleugels slaan horizontaal. De vleugelslagfrequentie is enorm groot, circa 80 Hz.





13



evenredig zijn met het oppervlak van een cirkel met de halve spanwijdte b als straal, en met de dichtheid van de lucht ρ :

$$\frac{1}{4} \pi b^2 \rho \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

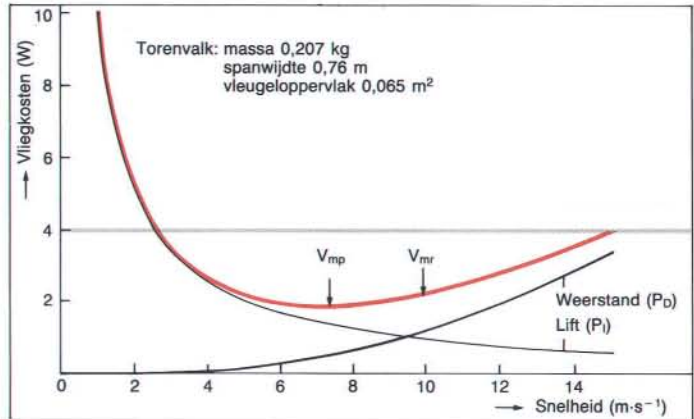
De vogel verplaatst zich met snelheid $V \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in de vliegrichting en verstoort daarbij per tijdseenheid een luchtmassa ter grootte van:

$$m = \frac{1}{4} \pi b^2 \rho V \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$$

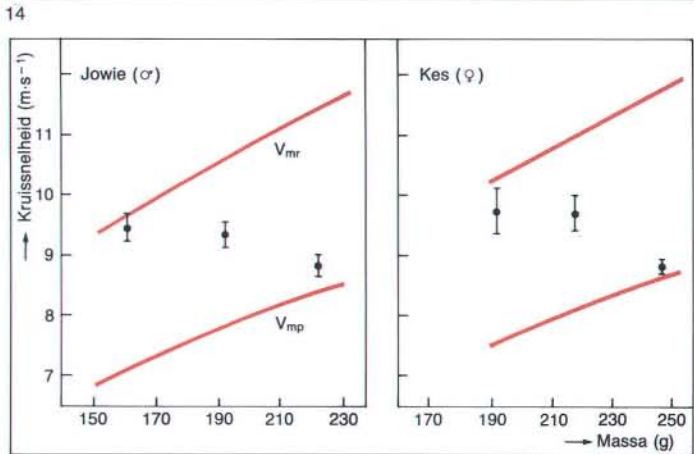
Stel dat die massa gemiddeld genomen een naar beneden gerichte snelheid v krijgt, dan is de impuls die de vogel per tijdseenheid in de lucht achter laat gelijk aan:

$$F_1 = \frac{1}{4} \pi b^2 \rho V v \quad (\text{kgm} \cdot \text{s}^{-1} = \text{Ns} \cdot \text{s}^{-1} = \text{N})$$

14. De vliegkosten zijn in deze grafiek uitgezet tegen de vliegsnelheid. Naarmate de laatste hoger is, is meer energie nodig voor de voortstuwing en minder voor de lift. Uit de curve die ontstaat als de lijnen P_D en P_L bij elkaar worden opgeteld zijn twee optimale vliegsnelheden af te lezen: de V_{mp} , waarbij de energiekosten per tijdseenheid het laagst zijn en de V_{mr} , waarbij de hoeveelheid energie per afgelegd afstand zo laag mogelijk is.



15. Beide 'Groningse' torenvalken maakten vele vluchten onbeladen en voorzien van 'prooien' van verschillend gewicht. De bereikte vliegsnelheden zijn hier aangegeven met stippen. De lijnen geven de waarden van V_{mr} en V_{mp} bij de corresponderende massa's. Het blijkt dan de vogels bij toenemende massa een snelheid kiezen die dichter bij V_{mp} ligt, met andere woorden ze gaan per tijdseenheid zo zuinig mogelijk vliegen.



16. Kes, de vrouwelijke torenvalk, wier prestaties in nevenstaande grafieken zijn vastgelegd, landt op de handschoen. Let op de uitgestrekte duimvleugel die ervoor zorgt dat de vleugel ook bij lage snelheid lift genereert.

In ons geval blijft de vogel op dezelfde hoogte vliegen en moet dus F_L gemiddeld gelijk zijn aan het gewicht van de vogel W en aan $-F_L$. We hebben nu een vergelijking waaruit we de onbekende v kunnen oplossen:

$$v = - \frac{F_L}{\frac{1}{4} \pi b^2 \rho V} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

De kinetische energie P_L die per tijdseenheid door de vogel aan de lucht wordt toegevoegd is:

$$P_L = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{F_L^2}{\frac{1}{2} \pi b^2 \rho V} \quad (\text{J} \cdot \text{s}^{-1} = \text{W})$$

P_L is omgekeerd evenredig met de snelheid en de vogel zal bij lage snelheden zeer veel energie moeten leveren om in de lucht te blijven, bij snelheid 0 (helikoptervlucht) is die zelfs oneindig groot en deze formule voorspelt dat vogels

dat niet kunnen. Een voorspelling die, zoals we eerder zagen, klopt voor vogels zwaarder dan een spreeuw.

De som van de horizontale weerstandskrachten op lichaam en vleugels, F_D , is volgens de aerodynamische theorie:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_D \quad (\text{N})$$

waarbij A het oppervlak van de vogel en C_D een weerstandscoefficiënt is die onder andere afhangt van de vorm van de vogel en de ruwheid van het oppervlak. C_D is voor een vogel in slagvlucht niet makkelijk te bepalen is.

De energie die geleverd moet worden om die krachten op te heffen is dan:

$$P_D = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_D \quad (\text{W})$$

P_D is evenredig met de snelheid tot de derde macht en speelt bij hogere snelheden een be-

langrijke rol in de totale vliegkosten, die de som zijn van P_1 en P_D .

Afbeelding 14 laat de resultaten zien voor een torenvalk van 207 g, berekend volgens de methode van Greenewalt. De som van de grafieken voor P_D en P_1 is een U-vormige curve die laat zien dat elke vogel twee optimale vliegsnelheden kent: de snelheid waarbij het energieverbruik per tijdseenheid zo laag mogelijk is (V_{mp}) en de snelheid (V_{mr}) waarbij de geïnvesteerde arbeid per afgelegde afstand zo laag mogelijk is. De tweede snelheid kan worden gevonden door vanuit de oorsprong de raaklijn langs de grafiek te trekken. De vliegkosten bij deze snelheden liggen in de buurt van de 2 W.

Ons vertrouwen in de uitkomsten van dit model zouden erg worden vergroot indien zou blijken dat torenvalken met snelheid V_{mr} vliegen en wanneer de vliegkosten in dezelfde orde van grootte zouden liggen. Afbeelding 15 toont de resultaten van vliegproeven met twee torenvalken in een 125 m lange gang. De punten zijn de gemiddelde snelheden (met standaardafwijking) die de dieren vlogen zonder en met 30 en 60 g gewicht aan de poten (60 g is zo ongeveer het gewicht van de zwaarste prooi). De getrokken lijnen zijn V_{mr} en V_{mp} , uitgezet als functie van het gewicht. Tijdens het vliegen zonder extra gewicht blijken de vogels hun kruissnelheid heel dicht in de buurt van V_{mr} te

kieszen. Beladen met 60 g heeft V_{mp} de absolute voorkeur en met 30 g vliegen ze met een snelheid daar tussen in. Het gedrag van de vogels geeft aan ons vertrouwen in dit aspect van het model gerechtvaardigd is.

In onze experimenten vinden we voor de vliegkosten 14 ± 3 W. Dit getal is het totale energieverbruik voor het vliegen en daarin zitten ook de kosten voor starten en landen en voor de verliezen die optreden bij de omzetting van metabolische energie naar mechanische energie. Indien het getal van 2 W uit het model juist is, zou dat duiden op een efficiëntie van tussen de 12 en 18%. Deze getallen zijn, vergeleken met schattingen in de literatuur die in de buurt van de 25% liggen, aan de lage kant, maar dat kan geweten worden aan het effect van het starten en landen.

Op grond van metingen aan de vliegspieren van torenvalken kan het maximale mechanische vermogen dat die continu kunnen leveren, worden geschat op ongeveer 4 W. Deze waarde, die als een horizontale lijn in afbeelding 14 is getekend, voorspelt dat torenvalken niet langdurig zullen kunnen vliegen bij snelheden lager dan $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, maar ook dat ze bij dergelijke windsnelheden niet meer kunnen bidden en die vaststelling klopt weer met de meetgegevens die in het veld zijn verzameld. Al deze gegevens versterken het vertrouwen in het model.

16



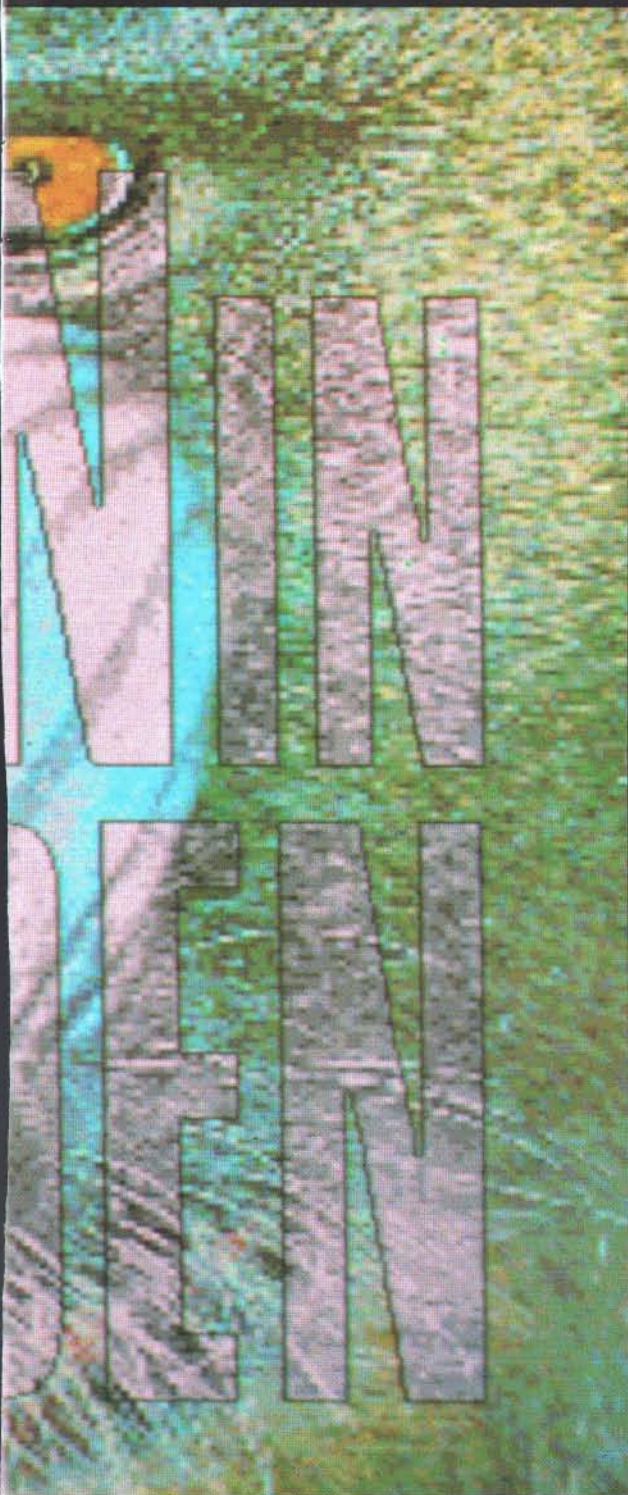
Literatuur

- Elsenaar A. Vliegen in stroperige lucht. *Natuur & Techniek* 1987: 55; 11, 880-891.
Tennekes H. Schaalregels in de vliegekunst. *Natuur & Techniek* 1979: 47; 3, 180-199.

Bronvermelding illustraties

- René Manger, Wageningen: pag. 626-627, 1
Peter Davey/Bruce Coleman, Uxbridge: 5
Frans Lanting/Bruce Coleman, Uxbridge: 6
Jeremy M.V. Rayner, University of Bristol: 7, 8
I. Ibrooks/Aquila, Studley, Warwickshire: 13
De overige illustraties zijn van de auteur.





R.J. Ekkers
*Technische Universiteit
Delft*

METEN IN BEELDEN

Een computer die kan zien, die de wereld om zich heen kan bekijken en globaal begrijpt wat er gebeurt. Dat is een aantrekkelijke gedachte. Zo'n computer kan voorwerpen herkennen en uitzoeken.

De praktijk is tot nu toe minder mooi. Weliswaar is de aansluiting tussen camera en computer te realiseren, maar bij de verwerking van de beelden blijkt het moeilijk het interpreterend vermogen van de mens te benaderen. Het blijkt erg moeilijk om programma's te schrijven die de computer in staat stellen dingen of mensen te herkennen.

Toch zijn er vorderingen. De ontwikkelingen rechtvaardigen de verwachting dat steeds snellere en intelligentere beeldverwerkingssystemen zullen verschijnen. Daarnaast wordt beeldverwerking op de personal computer steeds bruikbaar.

Beeldverwerkende programmatuur werkt met beelden die zijn opgenomen. Hierin onderscheidt zij zich van grafische technieken als *computer aided design* (CAD) en *beeldanimatie*, waarbij de beelden met behulp van de computer worden gegenereerd.

Mens en computer hebben op het punt van beeldverwerking beide hun sterke en zwakke kanten. Bekend zijn de optische trucs, die de mens gemakkelijk op het verkeerde been zetten (afb. 3). Men is geneigd het linker centrale vierkant lichter te vinden dan het rechter, terwijl ze precies even donker zijn. De computer trapt daar niet in: gevraagd naar de grijswaarde van beide vierkanten komt hij terug met de exact gemeten waarde, zonder zich te bekommeren om de context, die ons zo in de war bracht. Dat heeft ook zijn nadelen. Sommige zaken, die je als mens in één oogopslag ziet, zijn met een computer lastig te vinden. Het menselijk brein is bijvoorbeeld snel in staat de grote lijnen ergens in te zien. De computer daarentegen ziet en hanteert per definitie slechts basisinformatie: bits, bytes en pixels. Het menselijk brein laat automatisch – een gevolg van miljoenen jaren evolutie – niet ter zake doende informatie weg en concentreert zich op hetgeen in een gegeven situatie van belang is. Om bij een computergestuurd beeldverwerkingssysteem hetzelfde te bereiken – als dat al kan – zijn vaak zeer gecompliceerde operaties nodig, die lange bewerkingstijden vragen, en kostbare apparatuur.

Nemen we als voorbeeld gezichtsherkenning. Het is vrij lastig om op een tweedimensionaal beeld van een gezicht automatisch neus, wang of oog te laten aangeven (afb. 1 en 2). De moeilijkheidsgraad wordt nog verhoogd wanneer de binnenkomende beelden minder gestandaardiseerd zijn wat betreft formaat, opnamehoek (en face of en profil) en de aan- of afwezigheid van brillen, baarden en hoeden of petten.

In dit verband zijn de problemen illustratief die men heeft met het inkleuren van oude zwart-wit films. Daarbij geeft een operateur in het beginbeeldje van een scène de exacte grenzen van de kleurvlakken aan, en de erbij behorende kleur. Het volgende filmbeeldje wijkt niet zoveel af van dit eerste beeld, en het systeem is in staat om met de voorkennis over het vorige beeldje zelfstandig de kleuring van dit beeld en de volgende beeldjes uit te voeren.

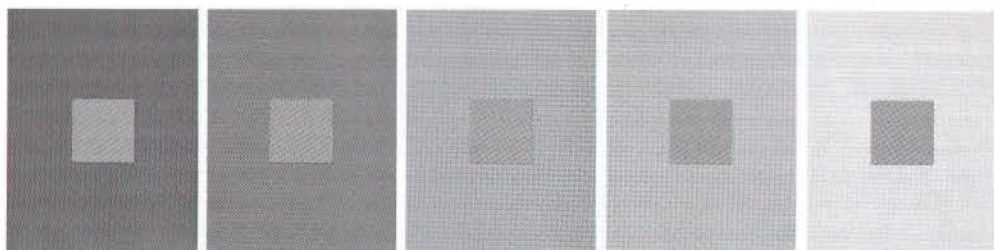
De zelfwerkzaamheid van de computer houdt echter op wanneer de scène eindigt, of een nieuw object in het beeld opdoemt.

Het scheiden van voorwerpen kan een beeldverwerkend systeem wel zelfstandig (afb. 4). Zelfstandig wil hier zeggen: voorzien van een algemeen besturingsprogramma, zonder specifieke hulp van de operateur. Maar ook hier blijft het zo, dat een programma, dat bedoeld



is om bijvoorbeeld elektronische componenten te classificeren, volledig in de war raakt als er plotseling een kiezelsteen – om maar iets te noemen – tussen de bekende vormen ligt.

Toch zijn er wel gebieden waarop de computer de mens al lang de baas is. Als het gaat om eentonige, repeterende werkzaamheden, die met grote precisie moeten worden uitgevoerd, of wanneer het zoeken naar de naald in een hooiberg betreft, laat de mens het al gauw afweten. Om bij dit laatste voorbeeld te blijven: een computer, die geprogrammeerd is om strootje voor strootje te testen of het misschien een naald is, vindt de naald in de hooiberg vroeg of laat. Deze eentonige klus moet misschien miljoenen malen herhaald worden, maar geschiedt alles bij elkaar toch met aanvaardbare snelheid, omdat de basissnelheid van de computer nu eenmaal groot is.



3



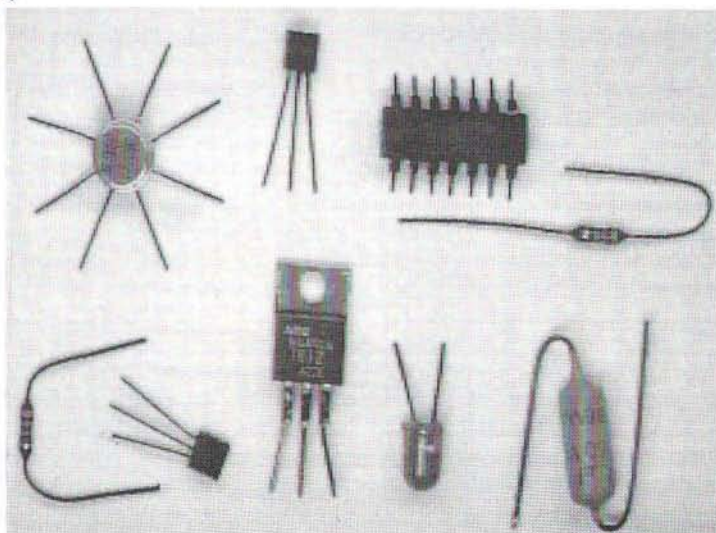
2

1 en 2. Gezichtsherkenning, waar de meeste mensen zeer vaardig in zijn, is voor een computer uitzonderlijk moeilijk. Bedekkende kledingstukken, al of niet uitstekende neuzen en oren, en de accentuering van huidplooien door de lichtval en de variabele opnamehoek, zorgen ervoor dat wat de computer betreft niet iedereen een duidelijk gezicht heeft. Wij herkennen in beide afbeeldingen onmiddellijk gezichten. In het vervolg van het artikel komen we ze nog tegen, maar dan onderworpen aan allerlei beeldbewerkingen.

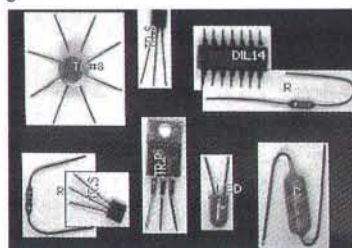
3. Het grijze vierkant in het midden lijkt van links naar rechts gaande steeds donkerder te worden. Dit is suggestie, veroorzaakt door de verschillende tinten van de achtergrond.

4, 5 en 6. Deze verzameling elektronische onderdelen (4) leent zich goed voor classificatie door de beeldverwerkende computer. Ze liggen los van elkaar, hun grijswaarde contrasteert duidelijk met de achtergrond en ze hebben duidelijke en unieke kenmerken. Het beeldverwerkingsprogramma scheidt eerst de componenten (5) en classificeert vervolgens op vormeigenschappen (6).

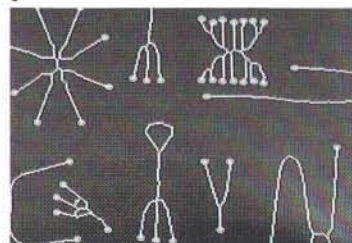
4



5



6



Ja of nee

De problemen rond beeldverwerking hangen in hoge mate af van wat we met de beelden willen doen. Een eenvoudige toepassing is het verbeteren van het ingevoerde beeld, zodat het er wat aardiger uit gaat zien. Voorbeelden daarvan zijn: contrastverbetering, toepassing van 'valse kleuren' om interessante beeldpartijen duidelijk te onderscheiden, verwijdering van verstoringen of desnoods retouche. Een tweede soort toepassing, en daar zal dit artikel verder op ingaan, is het putten van informatie uit het beeld.

Een opname bevat al gauw een enorme hoeveelheid informatie in de vorm van grijswaarden, structuren, objecten, en wat we er verder maar in willen zien. De analyse van het beeld komt dan noodzakelijk neer op datareductie. De oninteressante informatie moet verwijderd, zodat uiteindelijk slechts overblijft wat van belang is. Dat kan weer een beeld zijn, maar ook één of meer getallen. In het extreme geval kunnen de honderdduizenden bits van een oorspronkelijke opname worden teruggebracht tot één bit: ja of nee. Deze datareductie maakt de beeldinformatie niet alleen hanteerbaar voor de gebruiker, maar ook voor het systeem zelf. Op grond van gereduceerde data kan het systeem een beslissing nemen, bijvoorbeeld het volgende beeld nemen of juist een nadere in-

spectie beginnen op details van het beeld. Op deze wijze kunnen met relatief eenvoudige middelen 'intelligente' systemen worden gebouwd.

Informatie in het beeld

In wezen is een beeld voor de computer niets anders dan een verzameling punten waarbij voor ieder punt een grijswaarde is vastgelegd. De informatie in een beeld zit verscholen in de grijswaarden. We kunnen op de grijswaarden statistiek bedrijven: minimum- en maximumwaarden zoeken; mediane en gemiddelde waarden opsporen; standaarddeviatie en variantie vaststellen enzovoort. Deze statistische maten kunnen al iets zeggen over het beeld als geheel, maar ze zijn vooral van nut wanneer reeksen beelden moeten worden beoordeeld en kunnen dan een eerste classificatie geven.

Een voorbeeld van een systeem dat statistische waarden gebruikt is een beeldverwerker die moet testen of zich in een tunnel een auto bevindt. Aannemende dat diens koplampen branden is het voldoende om de maximum grijswaarde in een deel van het beeld te testen.

De meest toegepaste beeldanalyse is echter gericht op herkenning van in een beeld voorkomende structuren. Deze worden gevormd door groepen pixels met kenmerkende grijswaarden en vormen. In de meeste gevallen zul-

7



7. Beeldverwerking is tegenwoordig goed mogelijk met een personal computer. De foto toont een systeem waarop het door de auteur ontworpen programma draait. Wie real time wil werken zal echter speciale hardware moeten toevoegen.

8, 9 en 10. Voor kartografie maakt men vaak gebruik van luchtfoto's in kleur (10). Beelden uit het groene (8) en het blauwe (9) deel van het kleurenspectrum tonen dan heel verschillende details.

8



len we ervoor zorgen dat ons ingangsbeeld zodanig gedefinieerd is, dat de interessante partijen er door hun grijswaarde uitspringen. Dit kan desnoods bereikt worden door toepassing van filtering, speciale kleuringen (bij microscopie) of speciale opnemers (infrarood of ultraviolet). Niet alleen de grijswaarde van het object hoeft bepalend te zijn, ook de regelmaat van de vorm of een contrasterend patroon bieden herkenningmogelijkheden.

In moeilijke gevallen kan kleur hulp bieden. Weersatellieten maken bijvoorbeeld opnamen van hetzelfde beeld bij verschillende frequenties. Structuren die in de ene opname moeilijk te onderkennen zijn, zijn bij een andere lichtfrequentie vaak beter te onderscheiden. Voor kartografische doeleinden gebruikt men vaak opnamen van het rode, het groene en van het blauwe deel van het spectrum (afb. 8). Om de structuren te bepalen is het nodig de begrenzing van gebouwen, wegen en bomen nauwkeurig te vinden, maar daarin werken schaduwen verstorend. In het blauwe beeld is schaduw nagenoeg afwezig. Het groene beeld is weer geschikter om bomen en graspartijen te onderscheiden.

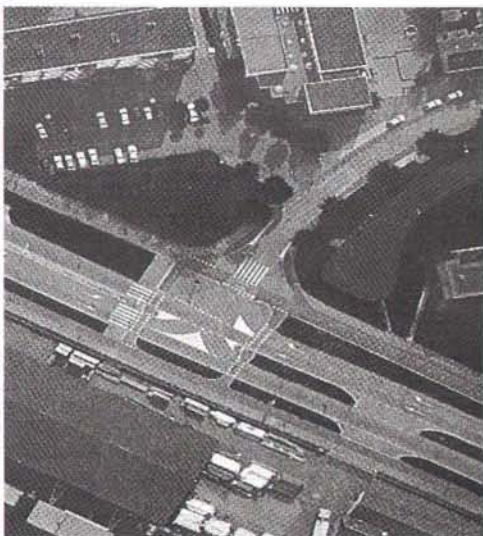
Als de grijswaarden, waarmee ook de tinten binnen een kleur worden bedoeld, op zich niet voldoende houvast bieden, wordt beeldherkenning al gauw gecompliceerd. We kunnen dan het systeem gebruik laten maken van

voorkennis over de te onderzoeken objecten. Vorm, positie in het beeld, oppervlaktestructuur of de grootte van de gewenste structuren zijn dan van belang.

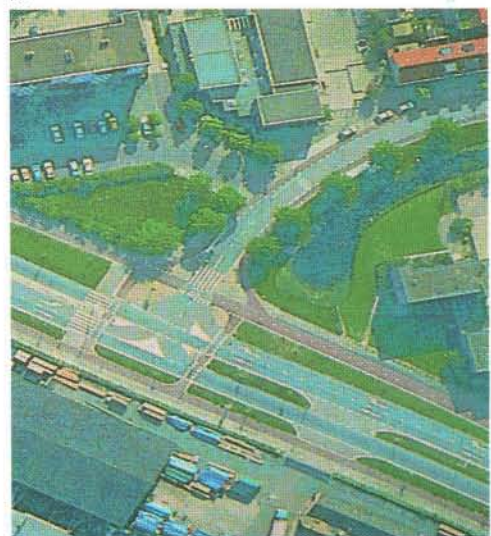
Beeld uit punten

Een computer hanteert een beeld altijd als een verzameling cijfers. De meeste TV-camera's leveren een snel variërende analoge spanning, die voor elk punt in het beeld, of voor een beeldlijn de helderheid weergeeft. Om zo'n beeld aan de computer te kunnen aanbieden moet het worden omgezet in digitale vorm, en opgeslagen in een geheugen, opdat de computer de getallen kan bereiken en modificeren. Aan dit geheugen is veelal een *weergave-systeem* (display) gekoppeld, zodat de activiteiten kunnen worden gevolgd. Het geheel heet: *frame grabber* ('frame' is Engels voor enkel TV-beeld). Het resultaat is een voor de computer bruikbare numerieke representatie van het beeld. Het meest gebruikelijk is de representatie waarbij iedere beeldpunt grijswaarden toegekend krijgt die variëren in 256 stappen, waarbij 0 = zwart en 255 = wit. Uiteraard is het aantal beeldpunten per oppervlak bepalend voor de scherpte waarmee het beeld is opgeslagen. Meestal bestaat een beeld uit 65 000 tot 260 000 getallen, die elk één punt uit het beeld voorstellen.

9



10





11



12



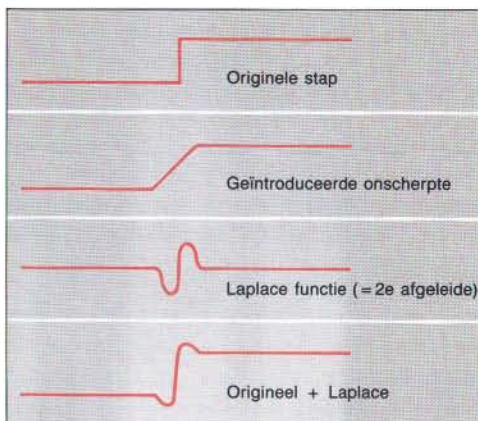
13



14



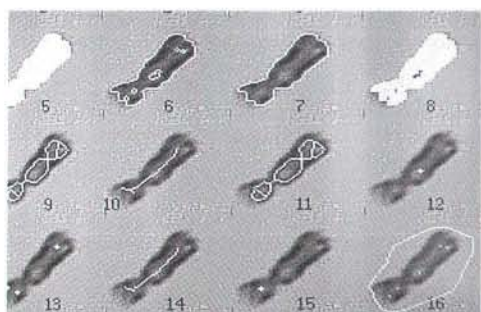
15



17



16



18



19

11, 12, 13, 14, 15 en 16. Omgevingsoperaties of filters nemen de grijswaarden van de pixels in een bepaalde omgeving (van bijvoorbeeld 3×3 pixels) en berekenen dan een nieuwe grijswaarde voor de centrale pixel. Dat kan volgens lineaire en niet-lineaire procedures. Het Laplace-filter (lineair) geeft de tweede afgeleide van de beeldovergangen (11). Opgeteld bij het origineel (12) ontstaat een scherper beeld door het ophalen van de beeldovergangen. De niet-lineaire Robertsgradiënt (13) levert de absolute waarde van de beeldovergangen. Het Kuwaharafilter

(niet-lineair) vermindert details in egale vlakken, maar houdt de overgangen in stand (14). 15 en 16 tenslotte bevestigen hetzelfde principe, alleen is de operatie in het ene geval in de horizontale richting (15) en in het andere geval in de verticale richting (16) uitgevoerd. Het is een lineaire gradiënt waarbij steeds de eerste afgeleide van de beeldovergangen is genomen. Deze laatste twee filters geven dus een beeld van de contrastovergangen in één richting, terwijl de contrasten in de andere richting juist verdwijnen.

Een onderdeel van de frame grabber is meestal nog een display-eenheid, die de inhoud van het computergeheugen continu vertaalt naar video, zodat de inhoud van het geheugen zichtbaar is.

Na het digitaliseren berust het uitvoeren van beeldverwerkingsoperaties op het wijzigen van de getallen waaruit het beeld bestaat. Een eenvoudig voorbeeld is de operatie waarbij alle getallen van 255 worden afgetrokken: 0 wordt 255, 1 wordt 254, 2 wordt 253, . . . , 254 wordt 1, 255 wordt 0. Daarmee wordt wit zwart, en zwart wit. Het oorspronkelijke beeld oogt dan als een negatief. We kunnen deze operatie ook wat algemener zien: de nieuwe grijswaarde is een functie van de oude. Er zijn net zoveel operaties van deze soort als er functies te bedenken zijn.

Voor de computer is rekenen met beelden dus precies hetzelfde als rekenen met om het even welke andere data. Het bijzondere komt voort uit het feit dat de data ons op een speciale manier worden voorgezet: niet in de vorm van tabellen of grafieken, maar als beeld, dat ons op een bijzondere manier aanspreekt.

Een ingewikkelder operatie dan bovenstaande wijzigt niet de pixels als onafhankelijke eenheden, maar laat de nieuwe grijswaarde van elk pixel berekenen uit de grijswaarden van een groepje pixels er omheen. Dit soort operaties (ook wel *filters* genaamd) biedt ons vele

mogelijkheden: het scherper of juist onscherper maken van het beeld, of het bepalen van het verloop in contrast, al dan niet met een zekere richtingsafhankelijkheid (afb. 11 t/m 16). Andere omgevingsoperaties leveren de contour, halen ruis weg en maken het mogelijk om onderscheid te maken tussen grote en kleine objecten in het beeld.

Een andere belangrijke familie van operaties houdt zich niet bezig met grijswaarden, maar met objecten. In dat geval heeft een pixel in het computergeheugen slechts één van twee mogelijke betekenissen: het stelt een deel van een object of van een stukje achtergrond voor. In het Intermezzo is een voorbeeld van zulke operaties opgenomen.

In de praktijk is er vrijwel nooit een toepassing van beeldverwerking waarbij één operatie al een oplossing levert. Operaties waarvan er hierboven een paar globaal beschreven zijn, vormen samen met vele andere, een onderdeel van een groot aantal bewerkingen, die het beeld als het ware persen en kneden, totdat er uiteindelijk iets bruikbaars overblijft.

Taktiek

Bij het analyseren van een beeld, met het doel metingen te verrichten aan de erin voorkomende objecten, is een strategie onontbeerlijk. Allereerst is er splitsing in drie onderdelen nodig:



20

17. Het schematisch weergegeven proces van beeldopscherpen met een Laplacefilter.

18. Het bepalen van de vormeigenschappen van objecten, in dit geval een microscopische opname van een chromosoom. De resultaten van verschillende operaties zijn in wit over het object geschreven. De beelden 5 t/m 8 laten meer en minder geslaagde pogingen zien de originele vorm van het object te vinden, zonder ruis en gaten. De beelden 9 t/m 16 zijn het resultaat van skeletoperaties



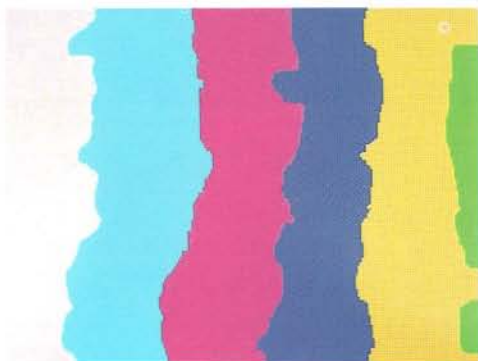
21

en afgeleide bewerkingen; ze geven prima mogelijkheden tot classificatie.

19, 20 en 21. Afbeelding 19 is ernstig verstoord door ruis. Het niet-lineaire percentiefilter is in staat de verstoorde pixels aan te passen. Het kijkt naar alle naastliggende pixels van het verstoorde pixel (3 x 3). Wanneer de verstoring te erg is, lukt de restauratie niet (20). Het helpt dan om in een ruimere omgeving te kijken (5 x 5, afb. 21). De grijswaarde-overgangen worden nu rafelig.



22



23

22, 23 en 24. Shading is een ongelijke verdeling van de gemiddelde grijswaarden over het beeld. Het is dan moeilijk of onmogelijk een scheiding tussen objecten en achtergrond te maken. In 22 zijn de grijswaarden omgezet in kleurstappen. Met niet-lineaire filters kunnen we een nauwkeurige afbeelding van de achtergrond maken, waarin de objecten geheel verdwenen zijn (23). Wanneer we deze van het oorspronkelijke beeld aftrekken is de shading verdwenen (24, in zwartwit).



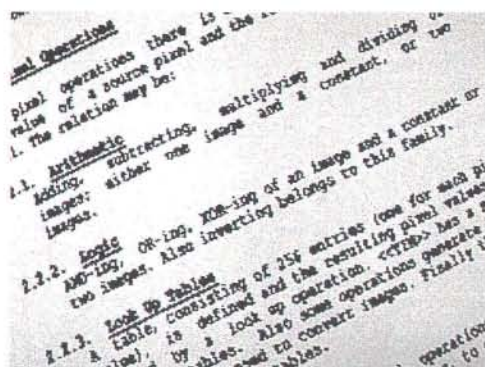
25

de *voorbewerking*, de *segmentatie* en de *analyse*. De drie onderdelen kunnen niet altijd achtereenvolgens doorlopen worden. Tijdens elke fase kan het nodig zijn om één of meer stappen terug te gaan, omdat de op dat moment verzamelde kennis een beter resultaat in de voorgaande fase mogelijk maakt. Hierna gaan we in op deze fasen, waarbij we enkele veel voorkomende problemen aanstippen.

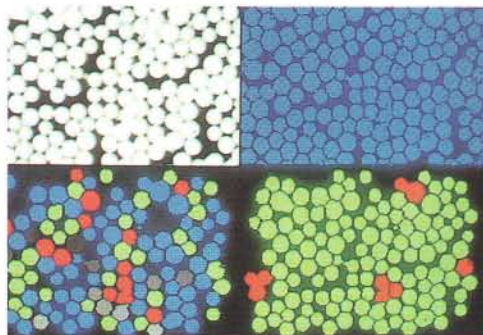
De *voorbewerking* is nagenoeg altijd een noodzakelijke fase, maar kan het best zo simpel mogelijk gehouden worden. Doel ervan is het beeld geschikt te maken voor de volgende fasen. Als er teveel *voorbewerking* plaats moet vinden, is dat een teken dat er iets mis is met de kwaliteit van het beeld. Het is vaak erg moeilijk, of onmogelijk om met beeldbewerking een slecht ingangsbeeld tot een aanvaardbaar peil op te krieken. Wat dit betreft zijn de

verwachtingen ten aanzien van wat een computer vermag nogal eens te hoog gesteld. Het is bijna altijd zo dat wat er bij de opname niet in zit er zelfs met de beste apparatuur en met de grootste inspanning niet uit te halen is. Bij een slecht ingangsbeeld is het dikwijls beter de inspanning te richten op de fase voor de opname. Dit betreft niet alleen zaken als belichting en de afstelling van de camera, maar ook de beslissing wat op te nemen en hoe. Wanneer bijvoorbeeld objecten te klein worden opgenomen, is geen nauwkeurige meting van hun omvang mogelijk. Aan elkaar geklonterde objecten zijn moeilijk afzonderlijk te bekijken. Een te contrastarm beeld kent een slechte object-achtergrondscheiding, zodat in dit geval de omvang moeilijk is vast te stellen.

In het segmentatieproces proberen we de objecten of de structuren van de achtergrond te



24



26

scheiden. De eenvoudigste en meest toegepaste techniek is de drempeling op basis van grijswaarden. Lichte pixels vormen dan bijvoorbeeld het object, pixels met een grijswaarde onder de drempelwaarde worden tot de achtergrond gerekend. Wanneer de voorbewerking juist heeft plaatsgevonden kan dit voldoende zijn, vaak echter zijn we er zo nog lang niet.

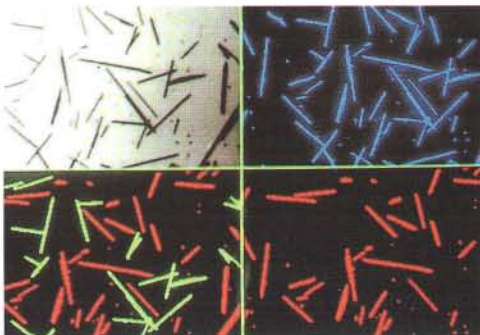
Het uiteindelijke resultaat van een object-achtergrondscheiding moet altijd een binair beeld zijn. De pixels zijn dan ontdaan van hun grijswaarden. Ieder beeldpunt heeft als informatie nog slechts een 1 of een 0 te dragen: object of achtergrond.

Wanneer de object-achtergrondscheiding gelukt is, volgt het labelproces, waarin wordt vastgesteld welke pixels bij welk object horen. Er wordt dan een nieuw beeld gemaakt, waarin in alle pixels van één object dezelfde grijswaar-

25, 26 en 27. Beeldverwerking in de praktijk, in dit geval bij DSM Research in Geleen, ten behoeve van structuuronderzoek van materialen. Men werkt er met een mobiel beeldverwerkingsstation (25), op de foto is de videocamera aangesloten op een interferentiemicroscop.

De drie overige foto's laten enkele toepassingen zien waarbij de beelden van verschillende oorsprong zijn. Afbeelding 26 is het resultaat van de deeltjesgroottemeting van polybutadien (latex). De deeltjes hebben een gemiddelde diameter van ongeveer 200 nm. Het oorspronkelijke beeld (linksboven) is opgenomen met de transmissie-elektronenmicroscop. Het binaire beeld (rechtsboven) is het eindresultaat van de segmentatie. Daarna worden de bolletjes geteld (links onder) en gemeten. Tenslotte worden via patroonherkenning niet correct gesegmenteerde deeltjes herkend en uit de telling verwijderd.

Een lichtmicroscopische opname van glasvezels uit een composietmateriaal was het uitgangspunt voor een andere toepassing (27). De lengte van de vezels (gemiddeld 0,1 nm) is van invloed op de eigenschappen van het materiaal. Uitgaande van een ongelijkmatig belicht origineel is toch een goed binair beeld verkregen. De clusters zijn apart gedetecteerd en verwijderd, waarna de meting kon worden uitgevoerd. Essentieel bij dit soort beeldverwerking is dat de voorberei- en opnametechnieken moeten worden aangepast voor een optimaal resultaat.



27

de krijgen; die van een ander object krijgen een daarvan te onderscheiden grijswaarde. Dit geeft houvast voor de analyse van de afzonderlijke objecten.

In de analysefase gaan we de feitelijke metingen verrichten. Meestal worden de objecten dan nader gekarakteriseerd op grond van hun omtrek, oppervlak, vormkenmerken of grijswaarde-informatie. Wat de vormparameter betreft kan bijvoorbeeld de karteligheid, of de mate waarin het object een cirkelvorm heeft worden bekeken.

Real time

Snel en langzaam zijn relatieve begrippen bij beeldverwerking en altijd erg apparaat afhankelijk, maar een goede maatstaf bij beeldverwerking is altijd het begrip *real time*. Omdat

Classificatie van munten

Een geschikt probleem om de mogelijkheden van beeldverwerking te demonstreren vinden we in het beeld van afb. I-1. Het doel is het classificeren van de munten, en het sommeren van de totale waarde. Er zijn twee problemen: de scene bevat lichte en donkere ruimten, en sommigen ruimten raken of overlappen elkaar. Tot de voorbewerking behoort het bepalen van de drempelwaarden voor de scheiding tussen achtergrond, koperen en nikkel munten. Het histogram (afb. I-4) laat zien dat we koper vinden tussen grijswaarde 10 en 60 en nikkel boven 80.

Daarna volgt de fase van de segmentatie die bestaat uit het vinden van de objecten, waaron-

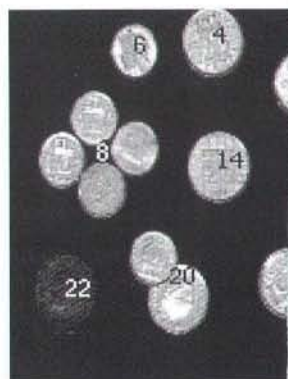
der clusters van munten kunnen zitten en ook ruispixels.

Van de gevonden objecten wordt eerste bepaald of ze uit een enkele munt of uit een cluster bestaan. Clusters onderscheiden zich van enkele munten door hun niet-cirkelvormige omtrek. De bepaling of een voorwerp cirkelvormig is, gebeurt door oppervlak en lengte van de omtrek te vergelijken door middel van de formule:

$$\frac{\text{omtrek}^2}{4\pi\text{oppervlak}}$$

De waarde ervan is één bij ronde voorwerpen.

TABEL 1 Kenmerken van objecten uit afb. I-2				
Object No.	Vorm factor	Grijswaarde		Opmerkingen
		Mediaan	Maximum	
2	1.347	31	246	Cluster
4	0.936	165	223	
6	0.875	156	247	
7	0.973	154	246	Cluster
8	1.433	146	229	
14	0.916	156	207	
16	1.443	191	254	Cluster
17	0.996	22	47	
20	1.218	159	254	Cluster
21	0.922	171	252	
22	1.073	22	61	
23	0.971	215	255	



I-1

een videocamera in verreweg de meeste gevallen dienst doet als signaalbron zijn de 25 beelden die een camera per seconde produceert maatgevend geworden voor de beoordeling of een proces in real time verloopt. Wanneer het bewerken van één beeldje binnen 40 milliseconden gebeurt, spreken we van een real-time-proces.

Gezien het hoge tempo waarmee de pixels dan binnenkomen stelt dit hoge eisen aan de bewerkingsapparatuur. Voor een beeld van 512x512 punten (ruim 260000 pixels) en 40 ms per beeld, moet de verwerkingssnelheid voor een pixel ongeveer 0,07 tot 0,10 μ s zijn. De bewerkende apparatuur moet dan ongeveer 10 tot 14 miljoen operaties per seconde uitvoeren.

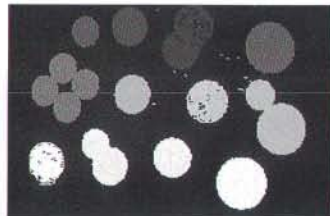
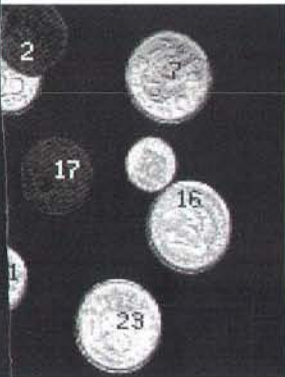
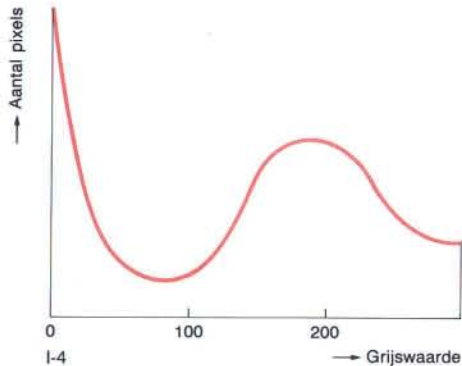
Een eenvoudige operatie op een groep van drie bij drie pixels omvat bijvoorbeeld negen vermenigvuldigingen en optellingen, en een deling. Een vermenigvuldiging mag dan netto niet langer duren dan 0,01 μ s, wat neerkomt op 100 miljoen vermenigvuldigingen per seconde. Het is uitgesloten deze snelheid met de huidige micro's en mini's te bereiken. Supercomputers halen de benodigde rekensnelheden wel, maar zijn veel te kostbaar en door hun organisatie ook minder geschikt voor deze toepassing. Het is veel economischer om met speciaal ontworpen hardware, toegevoegd aan relatief eenvoudige computers, de vereiste snelheid te bereiken. Wanneer dergelijk apparaat eenmaal beschikbaar is, worden vaak zo-

Het scheiden van de zo gevonden clusters gebeurt door gebruik te maken van de scherpe reflecties op de randen van de nikkel munten, die plaatselijk donkere pixels geven, terwijl koperen munten duidelijk tegen nikkelen afsteken.

Zo krijgen we een nieuw beeld, met uitsluitend losse munten. Voor de classificatie daarvan kunnen we beschikken over de volgende gegevens:

- het oppervlak
- de afmetingen van de omschreven rechthoek
- grijswaarde gegevens (als gemiddelde grijswaarde)

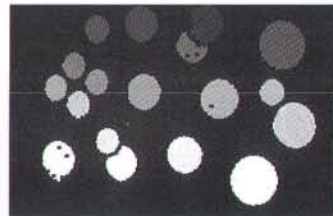
Met behulp daarvan zijn de munten goed te classificeren.



I-2

I-1. Een opname van te classificeren Nederlandse munten die gedeeltelijk over of tegen elkaar liggen.

I-2 en 3. Allereerst krijgt iedere munt of cluster van munten een eigen grijswaarde (I-2). Wanneer een object niet



I-3

rond is, betreft het kennelijk een cluster en worden scheidingsoperaties uitgevoerd. Dit resulteert in een nieuw beeld waarin iedere munt los ligt.

I-4. Het histogram van gemeten grijswaarden

genaamde *pipelines* opgezet. Een pipeline bestaat uit een aantal real time units, die achter elkaar worden geschakeld. Dit betekent, dat de videodata, eenmaal omgezet in digitale vorm, in één stroom door een reeks bewerkers worden gevoerd, en aan de uitgang daarvan bewerkt en wel ter beschikking staan. De bewerkingstijd is hierbij dus onafhankelijk van de ingewikkeldheid van de operatie.

Een andere architectuur voor beeldverwerkende systemen is het parallel bouwen van processoren. Dit kan zover gaan dat er voor iedere pixel een processor beschikbaar is. Zulke machines bestaan al voor 64x64-beelden, maar nog niet voor de tegenwoordig gebruikelijke 256x256-opnamen.

Bronvermelding illustraties

DSM Research, Geleen: 25, 26 en 27.

De overigen opnamen zijn vervaardigd door de auteur.



DE
GEHEIMEN
VAN

CHEOPS

Zwaartekracht- variaties verraden onontdekte ruimten

Joost Vermeulen
*Nederlands
Instituut voor
Archeologie
en Arabische
Studien
Cairo*

De Egyptische piramiden zijn omgeven door een waas van geheimzinnigheid. De bouwers en hun opdrachtgevers hebben het geheim van de precieze constructie meegenomen in hun graf. Archeologen, en vóór hen vaak graf-schenkers, hebben zich er toegang verschaft, maar hebben zij wel alles gevonden wat er te vinden is? De grootste piramide, die van farao Cheops bij Gizeh, een voorstad van Cairo, wordt momenteel met de meest moderne apparatuur onderzocht om te zien of er nog onontdekte ruimtes zijn. De speurtocht heeft een ware goudkoorts onder archeologen ontketend.

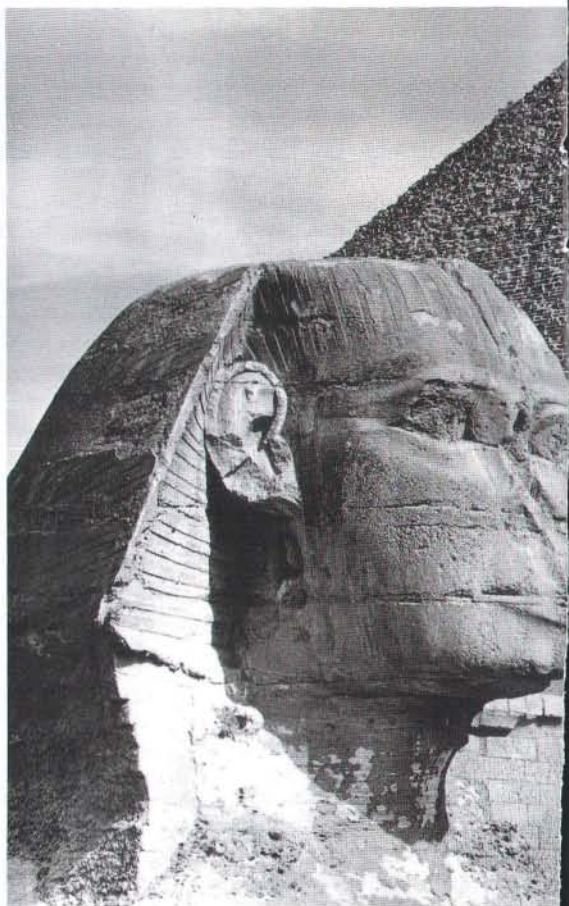


Compressoren staan buiten de piramide van Cheops om druk te leveren aan de boor, waarmee in de wand van de koninginnegang circa 2,5 m diepe gaten werden geboord. Dat gebeurde op plaatsen waar men op grond van radar- en zwaartekracht-metingen onontdekte ruimtes vermoedde. Vermoedelijk bevat de piramide ook op andere plaatsen nog onbekende ruimtes; achter iedere muur en achter iedere nis zou er een kunnen zitten.

De piramide van Cheops is de grootste en technisch meest verfijnde van de circa zeventig piramides, waarvan de resten nu nog de oevers van de Nijl sieren. Dit fascinerende bouwwerk werd al in de oudheid zo bewonderd dat het als één van de zeven wereldwonderen beschouwd werd. Sindsdien is het veelvuldig het object geweest van wetenschappelijk onderzoek. Ontelbaar is het aantal boeken dat aan dit architectonische wonder is gewijd.

Niet alleen serieuze wetenschappers voelden zich aangetrokken door de mystiek die dit reusachtige gebouw uitstraalt, ook dwepers, godsdienstwaaninnigen en mystici trokken en masse naar de vlakte bij Gizeh om dit wonder te aanschouwen en er, ieder op zijn eigen wijze, van te getuigen. Zo meenden sommigen dat de gehele wereldgeschiedenis was af te lezen uit het interieur van de grote piramide, anderen kenden aan dit gebouw zo'n grote magische kracht toe dat botte messen hun originele scherpte zouden herkrijgen, wanneer zij een nacht in de grafkamer hadden gelegen. Al deze theorieën konden niet voorkomen dat de belangrijkste vragen rondom de piramide van Cheops tot op heden onbeantwoord bleven: waarvoor diende dit bouwwerk precies; hoe is hij gebouwd; hoe zit de grote piramide precies in elkaar?

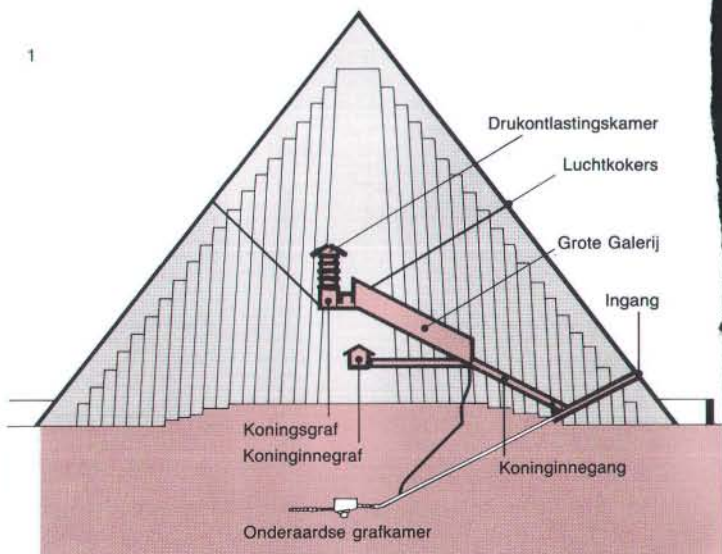
Het onderzoek dat een antwoord op al deze vragen moet geven is de laatste jaren in een stroomversnelling geraakt. Hoe meer men ech-

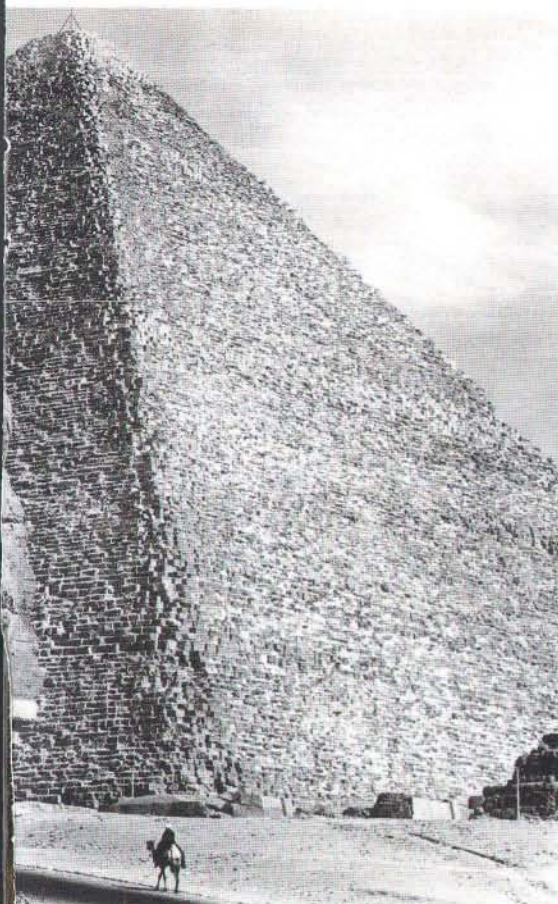


2

1. De piramide van Cheops bevat in elk geval een drietal grafkamers. De oudste daarvan ligt onder de grond. Bovengronds vinden we het koninginnegraf, dat overigens niet is gebruikt, en het koningsgraf, waarin een niet-gebruikte sarcofaag werd gevonden. De kunstmatige ingang bevindt zich ongeveer 17 m boven de grond in de oostelijke muur. Van daar loopt een gang naar beneden. Een stijgende gang loopt naar het koninginnegraf en de Grote Galerij die voert naar het koningsgraf. Daarboven bevinden zich de drukontlastingskamers, terwijl er ook twee luchtkanalen in de Grote Galerij uitkomen.

2. De piramide is 137 m hoog en maakt deel uit van een complex van drie grote piramides. De twee andere zijn van de farao's Chefren en Mycerinus. Aan de voet van de heuvel waar ze op liggen, ligt het bekende sfinxbeeld. Bij het proefdraaien met de apparatuur waarmee de piramide onderzocht zou worden, vond men ook hier een holle ruimte.





ter ontdekt, hoe groter het aantal vragen wordt. De vooruitgang die de laatste jaren werd geboekt is voor het grootste gedeelte te danken aan de toepassing van allerlei moderne technieken, zoals zwaartekrachtmeting, echoscopie en infraroodmetingen. De meeste van deze technieken zijn afkomstig uit de geologie, de medische wetenschap of de militaire research.

Het onderzoek dat de inleiding vormde tot deze ontwikkelingen begon in 1968. Toen startte de Ain Shams Universiteit uit Cairo, samen met Amerikaanse experts op het gebied van radiogolven, een onderzoek dat tot doel had meer inzicht te krijgen in de samenhang tussen de verschillende ruimtes binnenin de piramide. Na jaren van intensief onderzoek kwam dit onderzoeksteam tot de conclusie dat

het interieur van de piramide wel eens een andere structuur zou kunnen bezitten dan tot dan toe werd aangenomen. Concreter gezegd: misschien was het bouwwerk niet geheel massief.

In hun rapport, dat in 1985 werd aangeboden aan de Egyptische dienst van oudheden (EAO), formuleerden zij hun conclusie als volgt: "Zekerheid over de interne structuur van de piramide kan alleen verkregen worden door middel van een nader onderzoek binnenin de piramide. Dit onderzoek moet gepaard gaan met het verrichten van een beperkt aantal boringen op nader aan te geven plaatsen."

De eerste publikatie van dit Egyptisch/Amerikaanse onderzoek viel samen met het begin van het onderzoek van twee jonge Franse architecten, Gilles Dormion en Jean Baptiste Goidin. Hun onderzoek sloot goed aan bij de conclusies en aanbevelingen uit het rapport van de Amerikaanse experts. Ook de beide Fransen gingen er van uit dat de verschillende ruimtes, zowel de tot dan toe bekende, alsook de eventueel nog te ontdekken holtes, een onderlinge samenhang moeten hebben. Dit in tegenstelling tot de meeste eerdere theorieën, volgens welke alle bestaande ruimtes in de piramide corresponderen met de verschillende bouwfasen. Volgens de beide architecten kan deze zinvolle samenhang echter alleen maar bestaan wanneer men aanneemt dat er zich binnenin de piramide inderdaad nog een aantal onontdekte ruimtes bevindt.

Niet alleen op theoretische gronden namen zij aan dat er zich één of meerdere ruimtes moesten bevinden in het tot dan toe massief gedachte piramidelichaam (zie afb. 1). Volgens de beide architecten konden bepaalde structuren, die in de *koninginnegang* worden aangetroffen alleen maar verklaard worden wanneer men achter de wand van deze gang ruimtes postuleert.

Stripverhaal

Hun aandacht was op deze constructies gevestigd door het lezen van een stripverhaal. In die strip raken de hoofdpersonen gevangen in een stelsel van geheime gangen en kamers. De toegang tot deze ruimtes bevond zich volgens dit verhaal in de wand van de *koninginnegang* (afb. 4). De beide Fransen, die net waren teruggekeerd van een uitgebreide reis naar Egypte, waarbij zij ook een bezoek hadden ge-

bracht aan de piramide, schreven een brief aan de uitgever van deze strip. Daarin spraken zij hun bewondering uit voor de manier waarop de tekenaars aan hun fantasie vorm hadden gegeven. Tegelijk schreven zij echter dat een dergelijke constructie in de koninginnegang natuurlijk onzin was. Zij ontvingen een antwoord waarin de uitgever hen verzekerde dat bij het tekenen van het interieur van de piramide gewerkt was met originele foto's en op schaal vervaardigde tekeningen. De merkwuurde architectonische constructie, waarachter de striptekenaars vervolgens de geheime kamers hadden gesitueerd, was dus naar de werkelijkheid weergegeven.

Na deze uiterst verrassende mededeling trokken de twee architecten onmiddellijk opnieuw naar Egypte. Nadat zij met eigen ogen geconstateerd hadden dat er in de koninginnegang inderdaad afwijkingen te zien waren die konden wijzen op daarachter gelegen ruimtes, keerden zij in mei 1987 ten derde male terug naar Cairo, ditmaal in het gezelschap van experts van de Franse elektriciteitsmaatschappij, onder leiding van Jaques Montlucon, een expert op het gebied van de zwaartekrachtmeting (zie intermezzo I). Gedurende de hele maand mei werden er onder zijn leiding experimenten en metingen uitgevoerd in het binnenste van de piramide.

Hoewel de eerste resultaten het vermoeden bevestigden dat er zich één of meerdere ruimtes moesten bevinden, verscholen achter de wand van de koninginnegang, kon geen uitsluitel gegeven worden over de omvang van deze kamers. Ook bleef de vraag waarvoor zij eventueel hadden gediend onbeantwoord.

Intussen was er in Egypte enig tumult ontstaan naar aanleiding van het onderzoek in de piramide. Er werden zelfs vragen over gesteld in het parlement. Hoewel chauvinistische gevoelens hierbij zeker een rol speelden, men vroeg zich zelfs openlijk af waarom de Fransen en Amerikanen dit onderzoek deden en niet de Egyptenaren zelf, was de angst voor beschadiging van de piramide één van de belangrijkste oorzaken voor deze opschudding. Uitgebreide werkzaamheden binnenin de piramide en de daaruit voortvloeiende langdurige sluiting ervan voor het publiek, zouden, in een tijd waarin het toerisme in Egypte toch al onder grote druk staat, slechts te rechtvaardigen zijn wanneer er bij voorbaat spectaculaire

vondsten in het vooruitzicht werden gesteld. Bovendien moesten internationale experts de verzekering geven dat de piramide geen blijvende schade zou oplopen. De EAO besloot dan ook pas na lang overleg om de vergunningen voor verder onderzoek te verlenen en zij verbond daaraan zeer strenge veiligheidseisen. Tenslotte stelden zij als eis dat de piramide, gedurende de loop van het onderzoek, zoveel mogelijk toegankelijk moest blijven voor het toerisme.

Boringen

Het onderzoek zou bestaan uit de volgende drie onderdelen:

1. Zwaartekrachtmetingen in de koninginnegang en het verrichten van een drietal boringen in de wand daarvan.

3



2. Zwaartekrachtonderzoek in de omgeving van de eigenlijke grafkamer. Tijdens het eerste onderzoek was namelijk gebleken dat ook dáár afwijkingen voorkwamen.

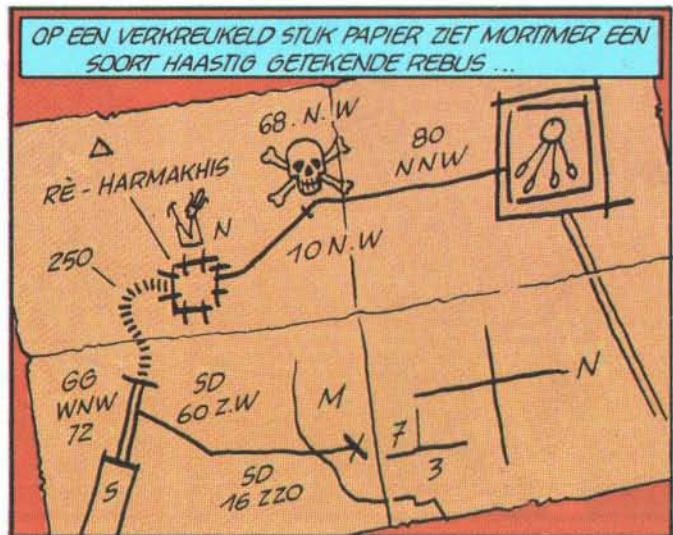
3. Onderzoek in de zogenaamde drukontlastingskamers die zich boven het graf van de farao bevinden en waarvan men aanvankelijk – ten onrechte – dacht dat ze dienden om het instorten van het plafond van de grafkamer tegen te gaan. De scheuren die daar waren aangetroffen zouden volgens de experts verband kunnen houden met nog andere onontdekte ruimtes.

Vooraf aan de boringen in de koningin-gang stelden de Egyptische autoriteiten uiterst strenge veiligheidseisen. Om daaraan te voldoen werd gekozen voor een operatie met miniboren waarbij gaten geboord werden met een diameter van slechts drie centimeter. Klei-

nere gaten waren niet mogelijk omdat uit de gaten nog monsters genomen moesten kunnen worden. Wanneer men inderdaad op een holle ruimte zou stuiten moesten de boorgaten bovendien voldoende diameter hebben om een glasvezelbuis te kunnen bevatten waardoorheen de ruimte gefotografeerd zou kunnen worden. Op deze manier zou men dan, zonder dat er direct grote werkzaamheden hoefden te worden uitgevoerd, een beeld kunnen krijgen van deze geheime kamers.

Eerst werd alle apparatuur getest buiten de piramide. Tot ieders grote verbazing gaven de resultaten van de zwaartekrachtmetingen ook daar een aantal verrassende resultaten te zien. Zo ontdekte men dat er een grote holte ligt onder de Sphinx. Van daaruit loopt vermoedelijk een gang die ergens onder de piramide uit moet komen. Ook werd tijdens deze testen de exacte

4



3. Een blik in de Grote Galerij in zuidelijke richting. Deze 8,5 m hoge gang leidt naar de grafkamer van de koning.

4. Deze plattegrond uit de strip 'Blake en Mortimer' en het geheim van de grote piramide' zette de Franse ar-

chitecten Dormion en Goidin op het spoor van nog onontdekte ruimtes. De Grote Galerij (GG) en de gang ernaartoe zijn bekend, de overige gangen en ruimtes werden door tekenaar E.P. Jacobs getekend op grond van bronnenonderzoek over de structuur van het bouwwerk.

Zwaartekrachtmetingen in piramides

Moderne zwaartekrachtmeters zijn zo gevoelig voor uiterst kleine veranderingen in de zwaartekracht, dat men een verminderde uitslag meet als men boven een holle ruimte staat. Een zwaartekrachtmeter wordt ook wel *gravimeter* genoemd naar het woord 'gravitatie', wat aantrekkingskracht van massa's betekent. Het principe is eenvoudig. Een veer met een gewicht eraan zal meer of minder uitrekken naar mate de zwaartekracht groter of kleiner is. Boven een holle ruimte is de zwaartekracht wat kleiner, als gevolg van de iets geringere massa eronder.

Het effect van een holle ruimte is in verhouding tot de totale aantrekkingskracht van de aarde zo gering, dat het verschil in uitrekking uiterst klein is. Om een gevoelig meetinstrument te bouwen moet men een constructie bedenken, die kleine zwaartekrachtafwijkingen vergroot weergeeft. Dit kan gerealiseerd worden door een horizontale balk zodanig op te hangen aan meerdere veren, dat een labiel evenwicht ontstaat. Het principe is in afbeelding I-2 weergegeven.

Als punt B bijna loodrecht boven punt A ligt en de balk bijna horizontaal is, zal een kleine verandering in g een vrij grote verandering in de hoek α geven. Deze uitwijking α wordt met elektronische aftasters gemeten. Met moderne gravimeters kan men veranderingen van de zwaartekracht meten van 10^{-9} deel van g . We noemen deze eenheid een *microGal* (naar Galilei). Daar de zwaartekracht ook met de hoogte verandert, betekent dit dat men een hoogteverandering van 5 mm reeds kan merken. Om deze precisie te bereiken moeten de veren en de constructie aan de hoogste eisen voldoen. Bovendien moet het in-

strument tot op 0,01 graad op constante temperatuur gehouden worden. Luchtdrukeffecten moeten gecompenseerd worden en het magnetische veld van de aarde moet afgeschermd worden. Bovendien moeten de metingen ook nog gecorrigeerd worden voor de aantrekkingskracht



I-1

I-1. Eén van de Franse onderzoekers verkent de vloer van de koninginnegang met een gravimeter. Plaatselijke variaties in de zwaartekracht duiden op de aanwezigheid van een holle ruimte.

I-2. Principe van een gravimeter. Kleine zwaartekrachtverschillen leiden tot een meetbare verandering in de uitwijking van de meetbalk. De stelschroef wordt dan gedraaid totdat de voltmeter weer op nul staat. Dan staat de meetbalk precies midden tussen de condensatorplaten. De stand van de stelschroef kan worden afgelezen en is een maat voor de zwaartekracht.

plaats bepaald waar een tweede zonneboot ligt. Deze is intussen door een ploeg Amerikaanse experts gefilmd en zal in de komende jaren worden opgegraven.

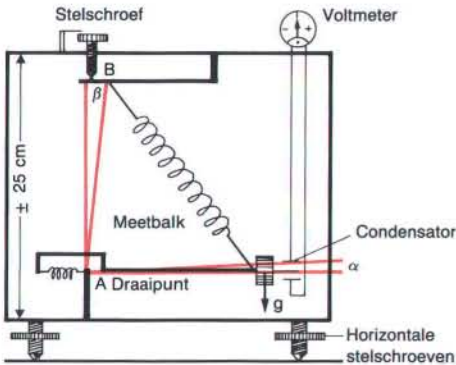
Nadat de experimenten buiten de piramide en in de omgeving van de Sphinx waren afgerond en de Egyptische autoriteiten er van overtuigd waren geraakt dat de gebruikte apparatuur inderdaad absoluut geen schade zou berokkenen aan het interieur van de piramide, kon het echte onderzoek in de piramide beginnen.

Om de exacte plaats vast te stellen waar men in de koninginnegang zou gaan boren werd eerst nog een tweetal series metingen uitgevoerd. Op grond van de resultaten daarvan kwam men tot de conclusie dat de gunstigste plaats daar was, waar de gang een hellingshoek heeft van 36° .

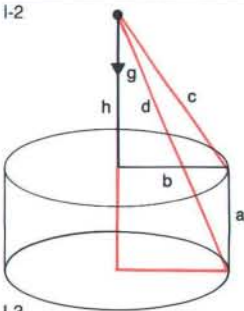
5. Onderzoekers in de weer met de boorinstallatie in de koninginnegang. Monsters van het materiaal van de muur en wat daarachter zit, worden verzameld in de holle boorkern.

van zon en maan, afhankelijk van de stand van deze hemellichamen. Dit noemt men de getijde-correctie.

De meest precieze instrumenten zijn tegenwoordig de La Coste-Romberg gravimeters. Ze zijn ongeveer kubusvormig met een zijdelengte



I-2



I-3

I-3. De vermindering van de zwaartekracht boven een cilindervormige ruimte wordt gegeven door de formule $g = 42 \cdot \rho \cdot (a + c - d)$.

van 25 cm. Een meting van de uitslag van het instrument duurt ongeveer 15 minuten.

Men kan in de gangen van de piramide en buiten op de piramide vrij snel een groot aantal punten meten. Aan de hand van de bekende vorm van de piramide en de ligging van de gangen kan men theoretisch berekenen wat de aantrekkingskracht van de piramide in elk punt is. Indien de metingen een lagere waarde geven, is dit een aanwijzing, dat er wel eens een holle ruimte onder zou kunnen zitten.

Het effect van een rechthoekige holle ruimte kan berekend worden met een vrij ingewikkelde formule. We kunnen echter een benadering van het effect berekenen door de aantrekkingskracht van een cilindervormige ruimte te berekenen. Deze formule is een stuk eenvoudiger. Hier geldt:

$$g = 42 \cdot \rho \cdot (a + c - d) \text{ microGal}$$

waarin $c = \sqrt{b^2 + h^2}$, $d = \sqrt{b^2 + (h+a)^2}$ en ρ de dichtheid gesteente in gram per cm^3 is. Piramides bestaan grotendeels uit zandsteen met een dichtheid van $\rho = 1,6$. Als men een ruimte heeft met een straal $b = 3 \text{ m}$ en een hoogte $a = 2 \text{ m}$ en men staat 3 m boven deze ruimte, dan is de vermindering van de zwaartekracht dus 28 microGal . Als men echter niet loodrecht boven de ruimte staat, maar er schuin boven, dan wordt het effect al snel minder en dus moeilijker op te sporen.

Ir G.L. Strang van Hees
Faculteit der Geodesie
T.U. Delft

5



Met zand gevulde ruimtes

De resultaten van de drie boringen waren veelzeggend. Bij de eerste boring trof men over een afstand van 265 centimeter achtereenvolgens aan: 128 centimeter solide kalksteen, 57 centimeter opvulmateriaal van kalksteen, 20 centimeter kalksteen opvulmateriaal vermengd met mortel, 25 centimeter fijn gezeefd kristallijn zand en tenslotte 35 centimeter solide kalksteen. In het tweede boorgat (235 cm) trof men achtereenvolgens aan: 198 centimeter compact

6. Bij het boren stuitten de onderzoekers op een smalle ruimte die met zand gevuld was. Het zand is speciaal voor dat doel aangevoerd uit het Fayyum-plateau, op enkele tientallen kilometers van de piramide. Een deel ervan wordt hier aan de pers getoond.

7. In 1954 werd in de grote piramide een zonneboot gevonden, die sinds 1982 te bezichtigen is in een museum vlak in de buurt. Inmiddels is ook een tweede exemplaar gevonden, dat echter nog op zijn plaats ligt. Mogelijk liggen er nog meer verborgen. De functie van de zonneboten is niet helemaal duidelijk, waarschijnlijk was deze ritueel van aard. De naam duidt op een verband met de zonnecultus; de overleden farao zou op die boten net als de zonnegod Ra de dagelijkse tocht langs de hemel en de nachtelijke reis door de onderwereld maken.



6

kalksteen gevolgd door 16 centimeter fijn zand en tenslotte nog 21 centimeter kalksteen. Bij de derde boring, 253 cm diep, die precies tussen de twee andere in lag, trof men aan: 144 centimeter kalksteen, waarvan 68 cm vermengd met mortel, tenslotte gevolgd door 51 centimeter gezeefd fijn zand, over een totale lengte van 253 centimeter.

Het eerste wat aan deze resultaten opvalt, is dat bij de middelste boring de grens van het zand niet werd bereikt. Het zand waarmee de holte is opgevuld vertoont op alle drie de plaatsen exact dezelfde samenstelling. Laboratoriumonderzoek wees uit dat dit zand afkomstig is van een plaats op het Fayyum-plateau (zuidwest van de piramide). Het is zand uit het oligoceen met een vrij hoog gehalte aan zware metalen. Het werd al snel duidelijk dat dit zand met een speciale reden was uitgekozen; waarom zou men dan anders zand over een grote afstand aanvoeren terwijl er ter plekke voldoende zand voorhanden was? Ook is duidelijk dat dit zand, voordat het werd aangebracht, gezeefd was. Waarom dit werd gedaan is voorlopig nog een raadsel.

Het aan de binnenzijde gebruikte kalksteen is van het Tura-type, genoemd naar de belang-

7



rijkste vindplaats van deze kalksteensoort, een plaats 30 kilometer ten zuiden van Cairo. Tot nu toe werd Turahkalk nog niet eerder aangetroffen in de piramide. Men nam altijd aan dat hij geheel was opgebouwd uit kalksteen dat ter plekke werd gewonnen. Turahkalk werd doorgaans alleen gebruikt voor de afwerking van grafkamers. Door zijn specifieke structuur is deze kalksteensoort bij uitstek geschikt om fresco's op aan te brengen of om teksten in uit te hakken.

De vondst van Turahkalksteen binnenin de piramide wakkerde de goudkoorts, die al enige tijd onder de archeologen woedde, nadat bekend was geworden dat er inderdaad onbekende ruimtes waren gevonden, alleen nog maar aan. Men hoopte dat de nieuw ontdekte verborgen kamers de eigenlijke grafkamer(s) van farao Cheops bevatten. De ruimte waarvan men tot dan toe had aangenomen dat het de grafkamer was, was immers leeg aangetroffen en hij bevatte, in tegenstelling tot de meeste grafkamers in de andere piramides ook geen

enkele versiering. Ook de sarcofaag die daar werd gevonden was nooit gebruikt geweest.

De Franse onderzoekers wakkerden de goudkoorts nog verder aan. Volgens hen zou er parallel aan het bestaande gangenstelsel een tweede stelsel van gangen en kamers liggen. Daarin zou zich ook de feitelijke grafkamer van farao Cheops bevinden.

Elektromagnetische scanning

Een heel ander idee omtrent de functie van deze met zand gevulde ruimtes werd verkondigd door prof Yoshimura van de Tokiose Waseda Universiteit. Volgens hem dienden deze kamer(s) als bescherming tegen aardbevingen. Dergelijke constructies komen namelijk in Japan, waar de aarde regelmatig beeft, ook voor, vooral bij grote gebouwen met een relatief hoge massa.

Prof Yoshimura maakt deel uit van een Japanse expeditie die op verzoek van de EAO het Franse onderzoeksteam kwam versterken. Hun instrumentarium voor het meten van zwaartekracht was nog geavanceerder dan dat van de Fransen. Bovendien maakten zij ook gebruik van een techniek die berust op het meten van grensvlakken met behulp van elektromagnetische golven: *electromagnetic scanning* (Intermezzo II). Deze was door de Japanners eerder met succes toegepast bij opgravingen in Luxor. De machine die zij gebruikten was een scanner die elektromagnetische golven produceert van 1 MegaHertz. Met behulp van deze apparatuur meende de Japanners dat zij in staat zouden zijn om ruimtes te ontdekken die zich tot dertig meter diep achter steen bevinden. Het in de piramide gebruikte kalksteen bleek echter een zodanige weerstand te bezitten, dat slechts tot op een diepte van vijf meter bruikbare gegevens werden verkregen.

Een voordeel van de door de Japanners gebruikte techniek boven die van de Fransen is dat niet alleen holle ruimtes worden geregistreerd, maar dat er ook een beeld kan worden gevormd van eventueel in die ruimte aanwezige objecten. Zo gaf de eerste serie metingen van de Japanners al meteen aan dat er zich in de met zand gevulde ruimtes ook nog objecten moeten bevinden. De Japanse metingen in de koninginnegang gaven nog een ander verrassend resultaat te zien. De door de Fransen gevonden holte bleek zich onder de vloer van



Electromagnetic scanning

Bij electromagnetic scanning wordt gebruik gemaakt van een grondradar ofwel *georadar*. De werking van een georadar komt overeen met die van een echolood. Een zender zendt korte elektromagnetische pulsen, uit die gereflecteerd worden door de grenslagen die zich in de ondergrond bevinden. Een ontvanger registreert de aankomsttijd van de teruggekaatste golven, de echo's van de grenslagen. Zo kan een medium 'belicht' worden door langzaam de georadar over de grond te trekken met als resultaat een radargram. Omdat de golven de afstand tussen de georadar en het grenslaag twee keer afleggen spreekt men van de two-way-traveltime (TWT) van een golf. Is de TWT bekend en weet men de snelheid V van de golf dan kan eenvoudig de diepte D van een grenslaag berekend worden.

Bij de georadar fungeert een antenne afwisselend als zender en ontvanger. De uitgezonden pulsen hebben een lengte van maar enkele nanoseconden (één miljardste seconde) en een frequentie, variërend per instrument, van 80 tot 900 MHz. Zo worden meer dan 5000 pulsen per seconde uitgezonden.

Een grenslaag wordt bepaald door het verschil in elektromagnetische eigenschappen van twee materialen. De twee belangrijkste zijn de geleidbaarheid (eenheid Siemens/meter) en de diëlektrische constante (dimensieloos). Zij bepalen samen met de frequentie de reflectiecoëfficiënt van de golf, dus welk deel gereflecteerd wordt en welk deel door blijft lopen, het dieptebereik, de absorptie van de golf door het medium en de golflengte van de puls. De golflengte van de puls is bepalend voor de resolutie ofwel oplossend vermogen, dus de grootte van het kleinste nog waar te nemen voorwerp. Al deze eigenschappen samen bepalen of we iets kunnen vinden of niet.

De toepasbaarheid van de georadar is afhankelijk van de frequentie. De 900 MHz radar heeft een dieptebereik van maar een halve meter met een scheidend vermogen van één centimeter, de 80 MHz radar heeft een dieptebereik van 30 meter, maar het scheidend vermogen is maar drie meter. Het is dus belangrijk om van tevoren na te gaan waar men naar op zoek is om zo de juiste georadar te kiezen.

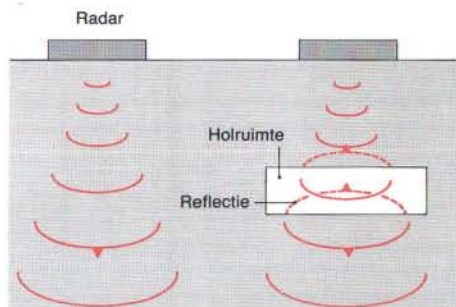
Bij de piramide van Cheops is men op zoek naar holruimtes, dus naar een grenslaag van lucht en het zandsteen waarvan de piramide is gebouwd. De geleidbaarheid en diëlektrische

8



8. Een blik op het plafond van het koningsgraf. Daarboven bevinden zich de zogenaamde drukontlastingskamers. Scheuren daarin duiden op het bestaan van ruimtes ter weerszijden van de andere kamers.

II-1. Het principe van de elektromagnetische scanning is hetzelfde als van de radar. Op grensvlakken worden de uitgezonden pulsen voor een deel teruggekaatst en opgevangen.



II-1

constanten van lucht en zandsteen zijn respectievelijk 0 en $0,004 \text{ Si} \cdot \text{m}^{-1}$ en 1 en 6. Maakt men gebruik van de 80 MHz radar dan moet de holruimte een maximale diepte van 30 meter en een minimale diameter van 1,5 m hebben om gezien te kunnen worden.

Ir F. Bussemaker
Afdeling Mijnbouwkunde
T.U. Delft

de gang voort te zetten. Metingen in de drukontlastingskamers boven de grafkamer toonden aan dat er daar in het plafond scheuren zitten. Deze scheuren lopen oost-west en duiden op een ten oosten van deze kamer gelegen ruimte. Ten westen van de koninginnekamer troffen de Japanners nog een ruimte aan die symmetrisch schijnt te liggen ten opzichte van de eerder door de Fransen gevonden ruimtes. De meeste van de door de Japanners aangebouwde ruimtes zijn leeg. Sommige zijn zo groot dat de bodem voorlopig niet kan worden gemeten. Er zijn inmiddels sterke aanwijzingen dat ook op de bodem van deze diepe holten voorwerpen liggen.

Hoe hol is de piramide?

Er is nog geen duidelijk inzicht in de samenhang tussen al deze nieuw ontdekte ruimtes. Wel duidelijk is dat de nu gevonden kamers en gangen nog maar een fractie vertegenwoordigen

van de totale hoeveelheid lege ruimte binnenin de piramide. Franse berekeningen gingen er al van uit dat 15% van de piramide uit holle ruimte bestaat. Ter vergelijking, alle tot dan toe bekende holle ruimte (koninginnekamer en gang, grafkamer, drukontlastingskamer en de grote galerij) vormt samen nog geen 1% van het totale volume.

De Japanners komen zelfs tot de slotsom dat ten minste 20% van het volume van de piramide uit lege ruimte moet bestaan. Zij baseren zich daarbij op het typisch Egyptische verlangen naar symmetrie, waardoor men vermoedelijk het aantal nu gevonden holtes moet verdubbelen. Bovendien hebben zij berekend dat de piramide bij een kleiner volumepercentage aan lege ruimtes door de dan ontstane krachten uit elkaar zou scheuren.

De komende tijd zullen er met nog krachtiger elektromagnetische scanners proeven genomen gaan worden. Niet uit te sluiten valt dat er in de komende periode, zij het op bescheiden schaal, opnieuw boringen zullen worden verricht binnenin de piramide. Wat ook de uitkomst van dit alles moge wezen, vast staat dat het model van de piramide drastisch herzien moet worden. Zeker is in ieder geval dat hij niet massief is, verre van zelfs.

Literatuur

Wegener Sleswijk A., *Piramidebouw - Oplevering in twintig jaar*. Natuur en Techniek 1985: 54; 5, 372-383.
Jacobs EP. *Het mysterie van de grote piramide*, deel 2. Brussel: Dargaud, 1987

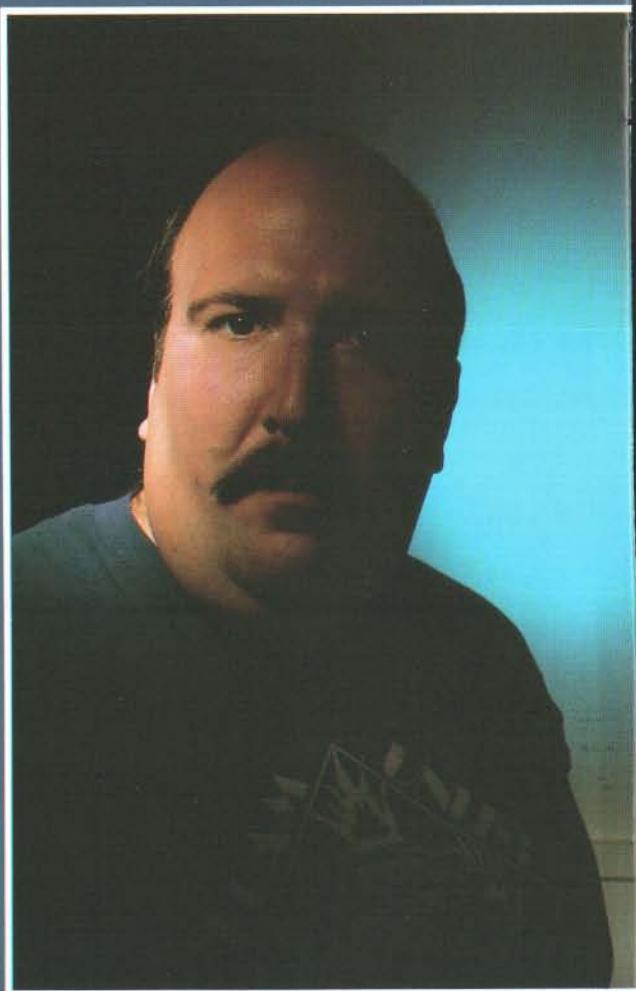
Bronvermelding illustraties

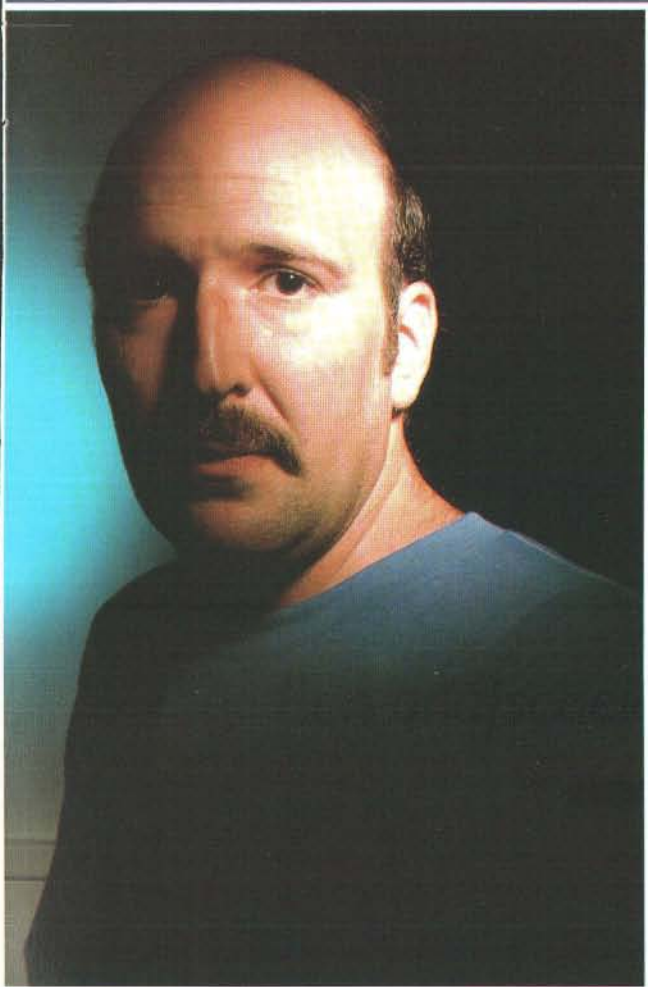
M. Elkkoussy/Sigma, ABC-press Amsterdam: pag. 651, 6.
Auke Tadema, Heemstede: pag. 650-651, 3, 7.
Uitgeverij Blake & Mortimer, Brussel: 4.
Egyptische dienst voor oudheden, Cairo: 2, I-1, 5.
Chris de Jong, Rotterdam: 8.

**D.I. Boomsma
W.M.A. Bressers
A.W. Eriksson
J.F. Orlebeke**

*Vakgroepen Psychonomie
en Antropogenetica
Vrije Universiteit
Amsterdam*

Tweelingenonderzoek richt zich op overeenkomsten en verschillen tussen mensen. Doel is om een indruk te krijgen van de mate waarin de verschillen erfelijk zijn, dan wel door omgevingsfactoren worden bepaald. Geschikte proefpersonen zijn eenzijdige tweelingen die gescheiden zijn opgevoed.





Jaarlijks worden in Nederland ongeveer 2000 en in België ongeveer 1100 tweelingparen geboren. Wie krijgt er een tweeling en hoe komt dat? Voor twee-eiige tweelingen zijn deze vragen gedeeltelijk te beantwoorden, voor een-eiige niet. Twee-eiige tweelingen komen vaker voor in de ene familie dan in de andere. Daarnaast speelt de leeftijd van de moeder een belangrijke rol. De geboorte van een-eiige tweelingen is nog steeds een mysterie. Wetenschappers zijn vaak geïnteresseerd in tweelingen. Voor veel eigenschappen kan een vergelijking van een-eiige tweelingen een eerste indicatie geven van de mate waarin erfelijke factoren een rol spelen. Om een precieze schatting te krijgen van het belang van erfelijke factoren worden in veel onderzoeken een-eiige tweelingen met twee-eiige vergeleken. Deze vorm van onderzoek wordt in dit artikel geïllustreerd met een tweelingenonderzoek naar risicofactoren voor hart- en vaatziekten.

ERFELIJKHEID EN MILIEU

Een onafscheidelijke tweeling

Tegenwoordig wekt een tweelinggeboorte bij de meeste mensen hooguit een bepaalde mate van verwondering op. In het verleden was dat bij de meeste volkeren wel anders. Het onbegrip dat heerste omtrent meerlinggeboorten gaf bijvoorbeeld in Wales tot in het begin van deze eeuw aanleiding tot een verering van tweelingen. Ze werden sterk geassocieerd met geluk en vruchtbaarheid. In andere gevallen echter zag men tweelingen als een bedreiging voor de gemeenschap, hetgeen zich uitte in rituelen waarbij moeder en tweeling verbannen werden of de dood vonden. Deze afkeer van tweelingen kon verschillende oorzaken hebben. Een meerlinggeboorte werd, door de vergelijking met de dierenwereld, gezien als een vernederende gebeurtenis voor de moeder en haar familie. Bovendien verdacht men de moeder vaak van ontrouw met een andere man of met een kwade geest. In veel gemeenschappen leverde de gelijktijdige geboorte van meerdere kinderen ook problemen op omdat leeftijd bepalend was in de sociale hiërarchie. In de loop der tijd zijn de meest extreme vormen van bijgeloof en de meest extreme rituelen wel verdwenen. Toch weten we ook nu nog niet precies hoe het komt dat iemand een tweeling krijgt.

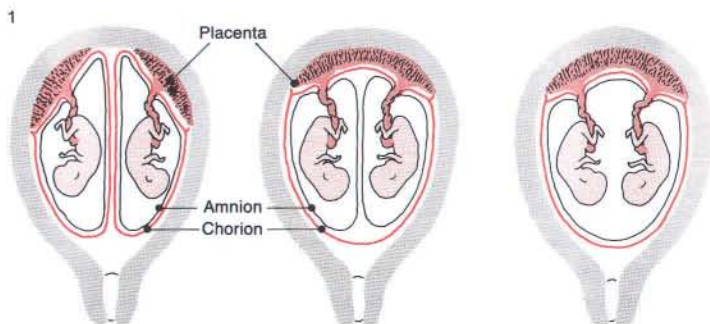
Er bestaan twee categorieën tweelingen: monozygote (MZ) en dizygote (DZ). *Dizygote* (twee-eiige) tweelingen ontstaan doordat bij een ovulatie twee eicellen in plaats van één vrijkomen. Beide worden bevrucht en ontwikkelen zich tot een embryo. Er is geen afwijking van de normale gang van zaken, alleen gaat alles in tweevoud. Genetisch lijken deze tweelingen dan ook niet méér op elkaar dan 'gewone' broers en zussen.

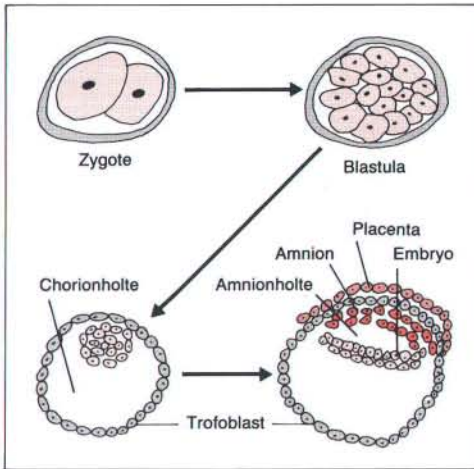
In het begin van iedere menstruele cyclus

worden, onder invloed van hormonen uit de hypofysevoorkwab, meerdere eicellen aangezet tot ontwikkeling. De hormonen die deze ontwikkeling stimuleren zijn de gonadotropines. Moeders van DZ-tweelingen hebben vaak een verhoogde gonadotropineconcentratie in het bloed. Meestal remt de ene eicel die tot volledige ontwikkeling komt, de ontwikkeling van de andere eicellen. Er is dus een balans waarbij de gonadotropines de eicellen aanzetten tot ontwikkeling en de zich ontwikkelende eicellen een remmende werking op elkaar uitoefenen. Wanneer deze balans niet in evenwicht is, kan dubbele ovulatie optreden en is de eerste aanzet tot een DZ-zwangerschap gegeven.

Monozygote (eeneiige) tweelingen ontstaan wanneer een bevruchte eicel zich in tweeën splitst. Beide helften bevatten dan hetzelfde genetische materiaal. De kinderen hebben altijd hetzelfde geslacht en lijken veel meer op elkaar dan 'gewone' broers en zussen. Aan de al dan niet gezamenlijke vruchtvliezen kan men zien in welk stadium de splitsing is opgetreden. Bij één derde van de MZ-tweelingen is de splitsing binnen vijf dagen na de bevruchting opgetreden. De vorming van de vruchtvliezen is dan nog niet begonnen zodat de embryo's ieder hun eigen vruchtvliezen hebben, net zoals DZ-tweelingen. Als de splitsing tot MZ-tweeling niet in de eerste vijf dagen optreedt, dan gebeurt dat meestal snel daarna. Deze tweelingen hebben een gemeenschappelijk *chorion*. Het chorion is het buitenste vruchtvlies en wordt kort na de vijfde dag gevormd. Het binnenste vruchtvlies, het *amnion* wordt op de tiende dag gevormd. Bij het merendeel van de tweelingen die één chorion delen, heeft de splitsing nog voor de tiende dag plaats gehad. Binnen het gemeenschappelijke

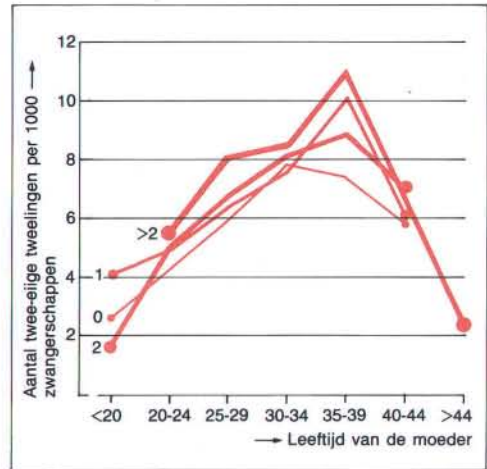
1. Twee-eiige tweelingen hebben altijd ieder een eigen chorion en amnion (A). Dat geldt ook voor eeneiige tweelingen, wanneer de zygote splitste voor de differentiatie van de trofoblast op de vijfde dag. Wanneer de splitsing plaats had na de vorming van het chorion, maar voor die van het amnion, hebben de tweelingen alleen een eigen amnion (B). Ze delen chorion en amnion als de splitsing nog later gebeurde (C).





2

2. Een foetus wordt omgeven door twee vliezen. Het buitenste, het chorion, ontwikkelt zich tegen het eind van de eerste week uit de trofoblast. Het amnion is het binnenste vlies en vormt zich pas in de tweede week.



3

3. De kans op het krijgen van een twee-eiige tweeling is afhankelijk van de leeftijd van de moeder en het aantal zwangerschappen dat zij heeft gehad (de getallen bij de curves).

chorion zitten dan twee kinderen met ieder een eigen amnion. Bij de 4% waarbij de splitsing pas na de tiende dag plaatsvindt, is er zowel een gemeenschappelijk chorion als amnion. Bij dergelijke late splitsingen is de scheiding soms onvolledig en ontstaat een Siamese tweeling.

Hoe het komt dat een bevruchte eicel zich splitst is nog een groot vraagteken. Misschien kunnen we iets leren van het gordeldier *Dasy-pus novemcinctus* dat als regel een-eiige vierlingen of achtlingen krijgt. Het is gebleken dat bij deze dieren een rustfase optreedt in de ontwikkeling van de bevruchte eicel en wel vlak voor de implantatie in het baarmoederslijmvlies. Of een vertraging in de implantatiefase ook bij mensen aanleiding geeft tot een verhoogde kans op splitsing van de bevruchte eicel, is nog onduidelijk.

Hoe weet men nu of een tweeling MZ of DZ is? Een tweelingpaar bestaande uit een jongen en een meisje is zeker twee-eiig. Bij kinderen van hetzelfde geslacht kan placenta-onderzoek vaak duidelijkheid verschaffen: wanneer in de placenta maar één chorion wordt aangetroffen is de tweeling waarschijnlijk MZ. Om in geval van gelijkslachtige tweelingen, die ieder een eigen chorion hadden, zekerheid te krijgen, moet van meer geavanceerde technieken ge-

bruik worden gemaakt. Door bloedgroepen en enzymen in het bloed – en de laatste tijd ook het DNA – van tweelingen te bekijken, kan men vaststellen of deze al dan niet genetisch identiek en dus MZ zijn. Vooral op latere leeftijd is natuurlijk ook aan uiterlijke kenmerken vaak al te zien om welk type tweeling het gaat.

Regel van Weinberg

Om in grote populaties volgens bovenstaande methoden te bepalen hoeveel MZ-, respectievelijk DZ-tweelingen er zijn, is een ondoenlijke zaak. Je moet dan overgaan tot schattingen. In 1900 is hiertoe door Weinberg een later naar hem genoemde regel opgesteld. Die is gebaseerd op een aantal aannamen: bij DZ tweelingen is het geslacht van het ene kind onafhankelijk van dat van zijn of haar tweelingbroer of zus; ieder kind heeft dus 50% kans om een jongen en 50% kans om een meisje te zijn. Dan zijn er onder de DZ-tweelingen 1/4 jj, 1/4 jm, 1/4 mj en 1/4 mm. Omdat MZ-tweelingen altijd hetzelfde geslacht hebben, is tweemaal het aantal tweelingen van ongelijk geslacht een goede schatting van het aantal DZ-tweelingen. Het aantal MZ-tweelingen is dan eenvoudig het totale aantal tweelingen min het aantal DZ-tweelingen.



4

Deze regel kan worden verfraaid door van de aannamen af te stappen en correcties in te voeren voor het feit dat er bijvoorbeeld niet evenveel jongens als meisjes worden geboren. Ook zijn er aanwijzingen dat méér dan de helft van de DZ-tweelingen van gelijk geslacht is. Het geslacht van een kind is namelijk gedeeltelijk afhankelijk van het tijdstip van de bevruchting. Bij bevruchting vroeg in de cyclus is de kans op een jongen groter terwijl later in de cyclus de kans op een meisje toeneemt. Omdat de bevruchting van beide eicellen meestal tegelijk plaatsvindt, zou de kans op twee kinderen van hetzelfde geslacht groter zijn dan de kans op een jongen en een meisje.

Om het voorkomen van tweelingen op verschillende plaatsen en in verschillende tijden te bekijken, moet goed worden gedefinieerd op welk moment je kijkt. Vanwege de grote sterfte onder tweelingen is er namelijk een aanzienlijk verschil tussen het aantal tweelingen dat wordt verwekt en het aantal dat in een volwasen populatie wordt aangetroffen. In 30 tot 50% van de tweelingzwangerschappen wordt één of beide vruchten in een vroeg stadium spontaan geaborteerd. Vaak zo vroeg dat de moeder het niet eens merkt. Doordat tweelingen in het algemeen te vroeg worden geboren, is er bovendien sprake van een hogere zuigelin-



5

gensterfte dan onder eenlingen. Wanneer men over tweelingfrequenties praat, gaat het meestal (en in ons geval zeker) over frequenties bij geboorte.

Tweelingfrequenties

Tussen verschillende volken bestaan grote verschillen in de frequentie van DZ-tweelingen. In China en Japan is die frequentie het laagst (minder dan 4 per 1000 bevallingen). In het Westen is die ongeveer twee keer zo hoog. In Afrika heeft men de hoogste frequentie met 16 DZ-tweelingen op iedere 1000 bevallingen. Binnen deze groepen worden weer kleinere verschillen aangetroffen die gedeeltelijk genetisch zijn vastgelegd. In sommige sterk geïsoleerde gebieden komen namelijk veel meer DZ-tweelingen voor dan in de omliggende streken. Ook uit stamboomonderzoek heeft men kunnen concluderen dat het krijgen van een tweeling een eigenschap is die gedeeltelijk erfelijk bepaald is en via de lijn van de moeder overerft. Er is echter nog een, minstens zo belangrijke, factor: de kans op een DZ-tweeling-geboorte neemt sterk toe met de leeftijd van de moeder (tot ongeveer 37 jaar). Dat komt omdat er, naarmate een vrouw ouder wordt, steeds meer gonadotropines in het bloed wor-



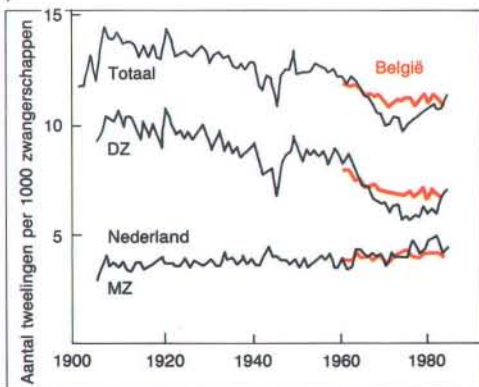
6

4 en 5. Eeneiige tweelingen (4) zijn genetisch identiek en lijken uiterlijk sterk op elkaar. Twee-eiige (5) tweelingen zijn in feite gewone broers en zussen die toevallig gelijktijdig werden verwekt. Heel zelden ontstaan deze tweelingen uit meer dan één coïtus en nog zeldzamer is het geval dat een twee-eiige tweeling twee verschillende vaders heeft.

6. In de dierenwereld komen vaak meerlingen voor; bij honden en konijnen is het zelfs regel. Het gordeldier *Dasypus novemcinctus* neemt een aparte plaats in, omdat het altijd eeneiige vierlingen krijgt.

7. Zowel in Nederland als in België daalde de frequentie van tweelinggeboorten in de loop van deze eeuw, vooral door een daling van het aantal twee-eiige tweelingen. De laatste jaren stijgt dit aantal echter weer. In 1984 werden in Nederland zo'n 2000 tweelingen geboren, waarvan er volgens de regel van Weinberg 800 eeneiig zijn. Voor België zijn deze getallen respectievelijk 1100 en 500.

7



den afgegeven. Naast de leeftijd van de moeder is het aantal kinderen dat een vrouw eerder kreeg van belang: vrouwen met veel kinderen hebben grotere kans op een DZ-tweeling.

Er zijn ook aanwijzingen dat het ter wereld brengen van een twee-eiige tweeling afhangt van de lichamelijke gesteldheid van de vrouw. De fysieke kracht, nodig om zo'n zware zwangerschap te kunnen voldragen, zou de oorzaak zijn van de hogere tweelingfrequentie op het platteland vergeleken met de stad. Ook het seizoen waarin de conceptie plaatsvindt kan een rol spelen. Dat kan allemaal bijdragen aan de schommelingen in de DZ-tweelingenfrequentie zoals die in de afbeelding 7 te zien zijn. Het blijkt dat in deze eeuw in de geïndustrialiseerde landen het aantal DZ-tweelinggeboorten sterk is afgenomen. Voor een deel kan dit worden verklaard door de dalende leeftijd waarop vrouwen kinderen krijgen. De laatste 15 jaar is de DZ-tweelingfrequentie overigens weer aan het stijgen. Dit komt grotendeels doordat de leeftijd waarop vrouwen hun eerste kind krijgen ook aan het stijgen is.

Zo variabel als de DZ-tweelingfrequentie is, zo stabiel is die van de MZ-tweelingen. Over de hele wereld worden al sinds jaar en dag 3 à 4 eeneiige tweelingen op iedere 1000 zwangerschappen gevonden. Er is geen verband met de

leeftijd van de moeder, erfelijke factoren zijn niet van belang en men beschouwt een bevruchte eicel die zich splitst dan ook als puur toeval. De laatste 20 jaar is er in veel Westerse landen een heel lichte stijging in de MZ-tweelingfrequentie. Dat zou kunnen komen door de verbeterde gezondheidszorg (vooral deze tweelingen zijn vaak het slachtoffer van spontane abortussen) maar ook door gebruik van de anti-conceptiepil.

Het effect van vroeger pilgebruik op een zwangerschap die ontstaat na het stoppen met de pil, stelt men zich als volgt voor. Bepaalde morfologische veranderingen, die door stoffen uit de pil in de eileider en baarmoederwand zijn ontstaan, blijven nog korte tijd na beëindiging van het pilgebruik aanwezig. In dierexperimenten is aangetoond dat dergelijke veranderingen tot een vertraging in de implantatie van de zygote in het baarmoederslijmvlies kunnen leiden. Dit zou dan weer, analoog aan wat men bij de *Dasypus novemcinctus* ziet, een grotere kans op splitsing van de zygote met zich meebrengen. Naast stijgingen in MZ-tweelingenfrequentie in veel Westeuropese landen, ondersteunen ook de constant blijvende frequenties in Italië, China en Tsjechoslowakije deze theorie. Daar wordt de pil bijna niet gebruikt.

Onderzoek met tweelingen

Tweelingen vormen voor de wetenschap een unieke groep om onderzoek mee te doen. Onderzoek met tweelingen kan ons bijvoorbeeld een eerste idee geven of bepaalde ziekten worden veroorzaakt door chromosomale of genetische afwijkingen. Dat het syndroom van Down (mongolisme) wordt veroorzaakt door een extra chromosoom, is onder andere aan het licht gekomen door de waarneming dat als bij DZ-tweelingen één van de twee een mongooltje is, de ander vrijwel altijd normaal is. Bij MZ-tweelingen daarentegen zijn in zo'n geval altijd beide kinderen mongooltjes.

Meer algemeen kan met behulp van tweelingonderzoek de vraag worden beantwoord of individuele verschillen in bepaalde eigenschappen samenhangen met verschillen in het *genotype* of met verschillen in de omgeving. Het begrip *omgeving* moet hier heel ruim worden opgevat: zowel voeding, scholing, als prenatale omstandigheden maken er deel van uit. Het



8

8 en 9. Veel eeneiige tweelingen lijken ook op elkaar als het gaat om de talenten die ze ontplooiën. Voorbeelden zijn de broers Willy en René van de Kerkhof en de zusters Güher en Süher Pékinel, een befaamd pianoduo. Volgens ons staat Güher links op de foto.

10. Met behulp van een DNA-'vingerafdruk' kan aange-

9



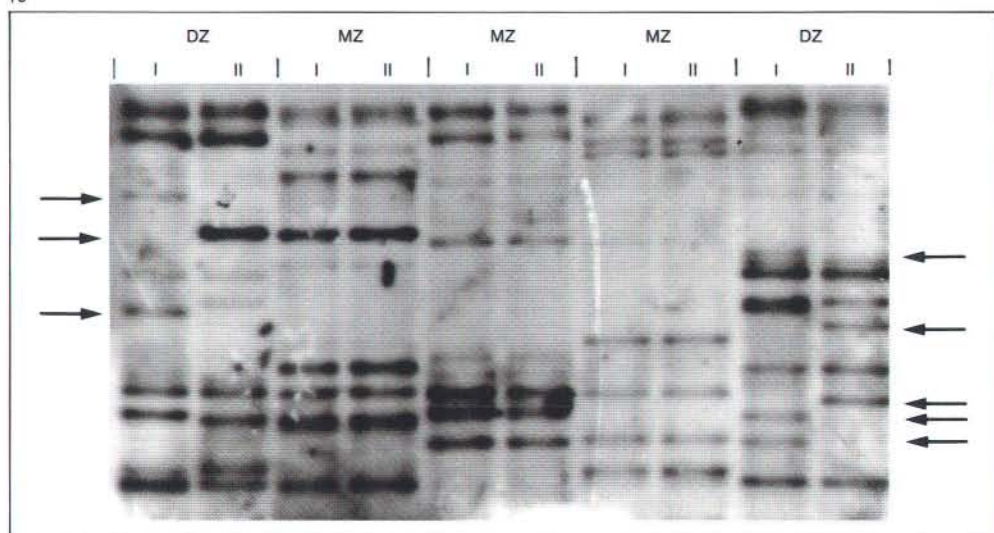


toond worden of een tweeling eenzijdig of twee-eiig is. Het DNA van de te testen personen wordt met restrictie enzymen in stukjes geknipt. Die stukjes worden gemengd met een gelabelde probe en met een gel gescheiden. Bij eenzijdige tweelingen (MZ), zal exact hetzelfde patroon ontstaan, terwijl bij twee-eiige (DZ) onderlinge verschillen aan te wijzen zijn (pijlen).

gaat hier niet om de vraag of aanleg of omgeving bepalend zijn voor een eigenschap, er is altijd sprake van interactie tussen beide, maar om de vraag hoe groot de invloed van genotype en omgeving is op de waargenomen variatie in die eigenschap.

Hoewel de resultaten van tweelingonderzoek vaak geanalyseerd worden met ingewikkelde statistische modellen, is de logica achter het onderzoek eenvoudig. MZ-tweelingen zijn genetisch identiek. Daarom moeten verschillen tussen twee leden van een MZ-paar worden veroorzaakt door niet-genetische factoren. Stel: een tweeling van een MZ-paar weegt 70 kilo, de andere weegt 64 kilo. Het verschil in gewicht moet zijn veroorzaakt door niet-genetische factoren. Omdat we allemaal weten dat lichaamsgewicht mede afhankelijk is van wat en hoeveel we eten, zijn de niet-genetische oorzaken in dit voorbeeld duidelijk aanwijsbaar. Bij veel andere eigenschappen is dit niet zo duidelijk en vormt het vergelijken van eenzijdige tweelingen een eerste aanwijzing dat een eigenschap niet voor 100% genetisch is bepaald. Bij schizofrenie is het zo dat bij ongeveer de helft van de MZ-paren, waarvan één van de twee schizofreen is, de andere dit vroeger of later ook wordt. Voor de andere helft van de MZ paren geldt dus, dat een identiek genotype niet leidt tot eenzelfde ziektebeeld; maar opgroeien in hetzelfde gezin evenmin.

10



11. Siamese tweelingen trokken vroeger nogal eens bekijks in variététheaters, zoals de tweeling Rosa-Josepha Blasek uit Bohemen, die in de jaren rond 1890 in Parijs optraden.

TABEL. Correlaties voor 27 MZ-paren en 25 DZ-paren van gelijk geslacht

	MZ	DZ
Systolische bloeddruk (rust)	0,60	0,61
Systolische bloeddruk (hoofdrekenen)	0,53	0,38
Cholesterol	0,83	0,59
Type-A gedrag	0,36	0,00

Verschillen tussen MZ-tweelingen zeggen dus iets over het belang van niet-genetische of omgevingsfactoren. *Overeenkomsten* tussen MZ-tweelingen zeggen echter nog niets over het belang van genetische factoren. Identieke tweelingen kunnen immers ook op elkaar lijken doordat ze opgroeien in hetzelfde gezin. Om nu een onderscheid te kunnen maken tussen de gemeenschappelijk omgeving en het gemeenschappelijk genotype kan men eenige tweelingen onderzoeken die vanaf hun geboorte gescheiden van elkaar zijn opgegroeid. Deze theoretisch aantrekkelijke oplossing stuit echter op een aantal bezwaren. De adoptiegezin- nen vormen een selecte groep, die onderling meer op elkaar lijken dan een groep willekeurige gezinnen en bovendien zijn er gewoon erg weinig gescheiden opgevoede MZ-tweelingen. Daarom worden MZ-tweelingen vergeleken met DZ-tweelingen en dan meestal met DZ-tweelingen van gelijk geslacht. Die zijn net als MZ-tweelingen exact even oud, hebben ook samen in de baarmoeder gezeten en groeien gelijktijdig op. Als MZ-tweelingen nu meer op elkaar lijken dan DZ-tweelingen, dan is dat een aanwijzing dat genetische factoren een rol spelen bij de onderzochte eigenschap.

Opvallend is overigens dat wanneer gescheiden opgevoede MZ-tweelingen worden vergeleken met MZ-tweelingen die samen zijn opgegroeid, tweelingen uit 'gescheiden' groep maar



11

iets minder op elkaar lijken wat betreft intelligentie en zelfs iets meer qua persoonlijkheid, dan samen opgevoede tweelingen.

Een voorbeeld van tweelingonderzoek

Aan de Vrije Universiteit in Amsterdam loopt op dit moment een tweelingonderzoek, waarin cardiovasculaire risicofactoren worden bestudeerd. Zulke risicofactoren zijn onder meer een hoog cholesterolgehalte, hoge bloeddruk, roken, overgewicht en gedragsfactoren die te maken hebben met de manier waarop mensen omgaan met stress, zoals bijvoorbeeld *type-A gedrag*. Aspecten van *type-A gedrag* zijn: haast, overactiviteit en proberen meerdere dingen tegelijk te doen. Bloeddruk wordt een aantal malen gemeten: terwijl de tweelingen zo rustig mogelijk in een cabine zitten, maar ook terwijl ze bezig zijn in hoog tempo getallen bij elkaar op te tellen. Zo'n hoofdrekenen wordt door de meeste mensen als redelijk stressvol ervaren. Op een andere dag wordt bij iedereen wat bloed afgenomen om het cholesterolgehalte te bepalen.

De resultaten van dit onderzoek, met andere woorden de gelijkenis tussen MZ-tweelingen en de gelijkenis tussen DZ-tweelingen, (maar bijvoorbeeld ook die tussen ouders en kinderen, of tussen ouders onderling) wordt uitgedrukt in een *correlatie*. Een correlatie van nul

betekent geen gelijkenis. Een correlatie van één betekent een volledige gelijkenis, met andere woorden geen enkel verschil tussen twee leden van een paar. De in ons onderzoek gevonden correlaties zijn opgenomen in de tabel.

Bij het vergelijken van de correlaties van MZ- en DZ-tweelingen kan nu een viertal situaties optreden.

1. De correlatie voor zowel MZ- als DZ-tweelingen is ongeveer nul. Dit impliceert dat noch genetische factoren, noch *gemeenschappelijke* omgevingsfactoren van belang zijn voor variatie in de onderzochte eigenschap. Alle variatie in die eigenschap wordt bepaald door voor ieder individu unieke omgevingsfactoren.

2. De correlatie is groter dan nul voor zowel MZ- als DZ-paren, maar er is geen verschil tussen beide correlaties. In dit geval leidt het identieke genotype van MZ-tweelingen niet tot een grotere gelijkenis dan bij DZ-tweelingen en concluderen we dat genetische factoren geen rol van betekenis spelen. Het feit dat de correlaties wel afwijken van nul, en zowel MZ- als DZ-tweelingen meer op elkaar lijken dan ongerelateerde individuen, duidt erop dat *gemeenschappelijke* omgevingsfactoren, zoals opgroeien in hetzelfde gezin, wel van belang zijn. Deze situatie trad in ons onderzoek op

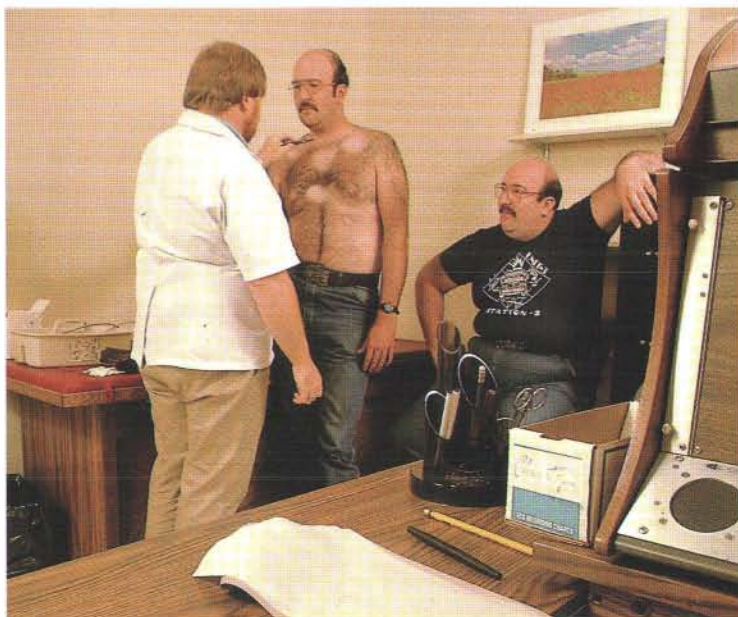
voor de systolische bloeddruk gemeten tijdens rust (zie tabel).

3. De MZ- en de DZ-correlaties zijn beide groter dan nul en bovendien is de MZ-correlatie groter dan de DZ-correlatie. Hier leidt de grotere genetische overeenkomst van MZ-tweelingen dus tot grotere overeenkomst in de onderzochte eigenschap. Als in ons onderzoek systolische bloeddruk werd gemeten tijdens de hoofdrekenaak, trad een toename op van 10 mm Hg. Tevens nam het verschil tussen de MZ- en DZ-correlaties toe, hetgeen wijst op een mogelijke genetische component in de bloeddrukreactie op een stressor. Een andere eigenschap waarbij genetische factoren van belang zijn, is het cholesterolgehalte in het bloed. Ook hier is een duidelijk verschil tussen de MZ- en DZ-correlaties, wat dus betekent dat verschillen in genotype significant bijdragen aan de variatie in cholesterolgehalte.

4. De MZ-correlatie is groter dan nul, maar de DZ-correlatie niet. Wij lijken iets dergelijks te vinden voor type-A gedrag. Hierbij past geen eenvoudig genetisch model, immers als genetische factoren van belang zijn, moet de correlatie voor DZ-tweelingen groter zijn dan nul. In dit soort situaties zou er sprake kunnen zijn van interacties tussen verschillende genen. Die

12

12. In ons onderzoek ligt de nadruk op psychologische aspecten van tweelingen. Andere groepen richtten zich (ook) op lichamelijke eigenschappen.



13. De frequentie van drielinggeboorten is direct af te leiden uit de tweelingfrequentie. Deze is ongeveer 1:87. Volgens de regel van Hellin is de drielingfrequentie dan 1:87² en de vierlingfrequentie 1:87³.

14. De effecten van assortative mating. Als de genotypen van de ouders (G_{vader} en G_{moeder}) zijn gecorreleerd, bijvoorbeeld als ze neef en nicht zijn, lijken hun kinderen meer op elkaar dan gemiddeld 50%. De correlatie tussen de genotypen van de kinderen kan uit de figuur worden afgeleid door alle mogelijke combinaties van paden van het ene kind naar het andere te doorlopen. De correlatie wordt dan in het geval van assortative mating: $r = 2(1/2 \cdot 1/2) + 2(1/2 \cdot 1/2)m = 1/2 + 1/2m$.



13

interacties zijn identiek voor MZ-tweelingen, maar hoe meer genen erbij betrokken zijn, des te kleiner de kans dat er gelijkenis is tussen DZ-tweelingen.

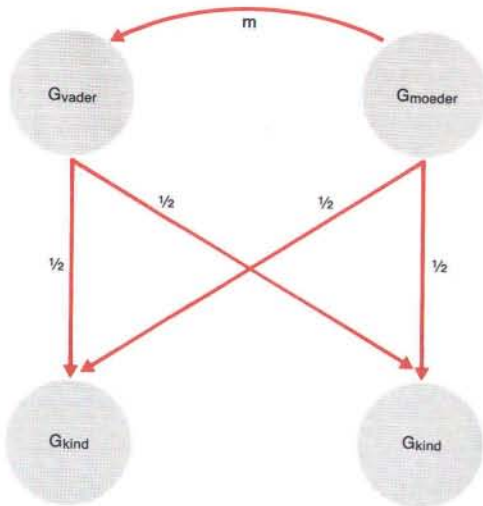
Het belang van genetische factoren kan worden geschat door tweemaal het verschil tussen de MZ- en de DZ-correlatie (r) te nemen: $h^2 = 2(r_{MZ} - r_{DZ})$. Deze h^2 (van *heritability*) is een maat voor de hoeveelheid variantie die wordt verklaard door genetische verschillen tussen mensen. De heritability is plaats- en tijdgebonden: het belang van genetische factoren kan toenemen als bijvoorbeeld de omgeving meer uniform wordt. Bovendien geldt de bepaling van de heritability strikt genomen slechts voor de leeftijdsgroep waarvoor h^2 werd berekend. Uit onderzoek is gebleken dat vooral de DZ-correlatie afneemt als tweelingen ouder worden. De tweelingen in ons onderzoek zijn gemiddeld 16 jaar. Het belang van genetische factoren voor variatie in bloeddruk kan toenemen als de groep ouder wordt.

Ouders van tweelingen

Zoals al even werd aangestipt is het ook mogelijk een correlatie te berekenen tussen ouders onderling of tussen ouders en kinderen. Wij onderzoeken niet alleen tweelingen maar ook hun ouders. Eén van de redenen hiervoor is dat uit veel onderzoek blijkt dat ouders voor een heel scala van eigenschappen meer op el-

kaar lijken dan je op grond van toeval zou verwachten. Lange mensen trouwen bijvoorbeeld vaker met iemand die ook aan de lange kant is. Mensen kiezen, bewust of onbewust, iemand op wie ze lijken. Dit verschijnsel, dat *assortative mating* wordt genoemd, kan belangrijke implicaties hebben. Als mensen een partner kiezen op wie ze in genetisch opzicht lijken, dan betekent dat, dat zowel de genetische gelijkenis tussen ouders en kinderen toeneemt, als tussen broers en zussen. Dit laatste geldt natuurlijk niet voor eenelinge tweelingen, want die zijn al genetisch 100% gelijk, maar wel voor twee-eiige tweelingen. Dit kan weer de schatting beïnvloeden van de mate waarin genetische factoren een rol spelen.

Afgezien van assortative mating is een tweede reden om ouders van tweelingen te bestuderen de mogelijkheid om correlaties tussen ouders en kinderen te berekenen. Als uit tweelingonderzoek blijkt dat een bepaalde eigenschap gedeeltelijk genetisch bepaald is, moeten ouders en kinderen op elkaar lijken. Lijken ze meer op elkaar dan je op grond van de genetica kunt verklaren, dan moet de gemeenschappelijke gezinsomgeving een rol spelen. Overigens is de aanname hierbij dat de expressie van genen niet leeftijdsafhankelijk is, wat onwaarschijnlijk is. Omgekeerd, als ouders en kinderen minder op elkaar lijken dan op grond van de genetica te verwachten is, zou die leeftijdsafhankelijke expressie van belang kunnen zijn.



14

Uitkomsten van tweelingonderzoek

Wat betekent het wanneer er, zoals in ons onderzoek voor cholesterolgehalte, een redelijk hoge h^2 wordt gevonden? Zoals gezegd, houdt dat in dat verschillen in cholesterolniveau in belangrijke mate samenhangen met genetische verschillen tussen mensen. Het betekent echter niet dat deze verschillen daarmee onveranderlijk zijn; h^2 kan ook worden beschouwd als een maat die aangeeft in welke mate een bepaalde eigenschap gevoelig is voor bestaande variatie in de omgeving. Een hoge h^2 duidt erop dat *bestaande* omgevingsvariatie weinig bijdraagt aan variatie in de onderzochte eigenschap. Wanneer verandering in die eigenschap wordt nagestreefd, omdat bijvoorbeeld een verlaging in het cholesterolgehalte een verminderd risico voor hart- en vaatziekten inhoudt, dan zal gezocht moeten worden naar veranderingen van de omgeving die groter zijn dan de bestaande variatie. Een lage h^2 impliceert dat verandering mogelijk is binnen het bestaande complex van omgevingsfactoren.

We kunnen met behulp van tweelingonderzoek zelfs zeggen welke omgevingsfactoren daarvoor het meest aangewezen zijn. Het is immers mogelijk om een onderscheid te maken tussen omgevingsfactoren die hun invloed uitoefenen op alle leden van een gezin, de *gemeenschappelijke omgevingsfactoren*, en omgevingsfactoren die binnen een gezin juist voor

verschillen zorgen, de unieke ervaringen. Waarschijnlijk is het makkelijker de gemeenschappelijke omgevingsfactoren op te sporen en te veranderen dan de voor iedereen unieke factoren. Tweelingonderzoek is een snelle methode om eigenschappen te onderzoeken op hun gevoeligheid voor de verschillende omgevingseffecten binnen en tussen gezinnen.

Toekomst van tweelingonderzoek

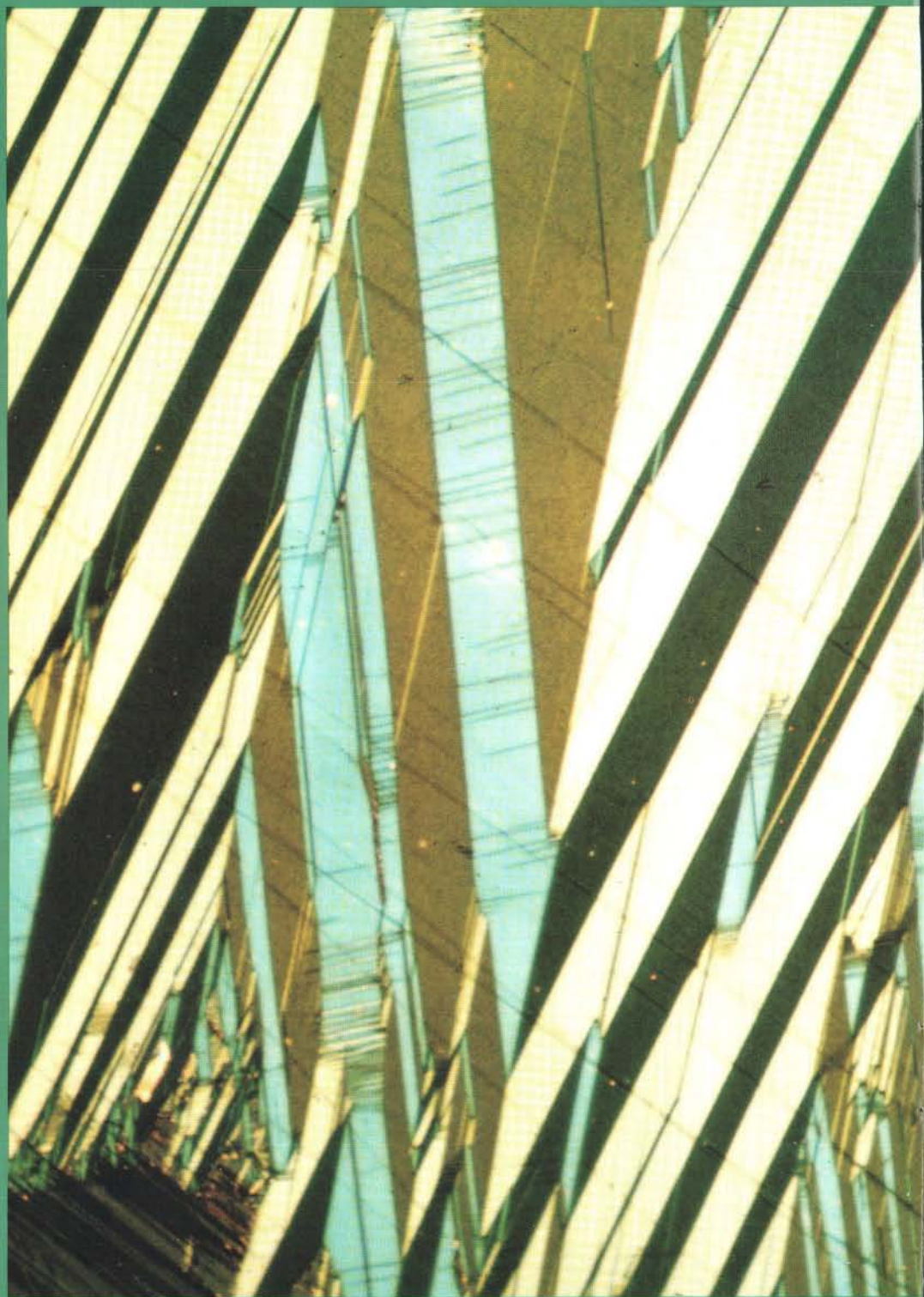
Is er met de opkomst van het moderne onderzoek op het niveau van chromosomen en genen nog een rol weggelegd voor het ouderwetse tweelingonderzoek? Genetische analyses gebaseerd op tweelingonderzoek blijven steken in een analyse van het fenotype, dat wil zeggen in datgene wat we aan de 'buitenkant' kunnen meten. De biologische mechanismen die ervoor zorgen dat genetische variatie zich uit in het fenotype, blijven in eerste instantie onverklaard. Echter, voor veel eigenschappen die geen eenvoudig patroon van Mendeliaanse overerving vertonen, maar het gevolg zijn van de acties van vele genen gelijktijdig, zal de genetische analyse voorlopig afhankelijk blijven van adoptie- en tweelingonderzoek. Voor veel eigenschappen blijft dit soort onderzoek de manier om een eerste indruk te krijgen van de mate waarin genetische verschillen tussen individuen van belang zijn voor variatie in de onderzochte eigenschappen. Dit gegeven kan dan vervolgens aanleiding zijn om gericht te zoeken naar de manier waarop die genetische verschillen zich uit in het fenotype. In ons onderzoek zouden cholesterol en bloeddrukreactiviteit zich lenen voor een dergelijke analyse.

Literatuur

Lewontin, Richard C. Menselijke verscheidenheid – Het spel van erfelijkheid, milieu en toeval. Maastricht: Natuur & Techniek, 1985.

Bronvermelding illustraties

Bob Sacha/Transworld Features Holland BV Haarlem: pag. 662-663, 12.
Kees Keuch, Audiovisueel Centrum VU: 4, 5, 13.
Jeff Foot/Bruce Coleman, Uxbridge: 6.
Christofori, Amsterdam: 8.
ANP-foto, Amsterdam: 9.
E. Bakker, Laboratorium voor Antropogenetica R.U. Leiden: 10.
Ann Ronan, Taunton, Somerset: 11.





Een vormgeheugen-
legering zoals zij
zich in haar 'koude'
vorm voordoet in
een lichtmicroscop
onder gepolariseerd
licht. De kleuren
worden bepaald
door de oriëntatie
van het kristalroos-
ter ten opzichte van
de polarisatie-richt-
ing van het licht.

Temperatuursveranderingen van slechts enkele tientallen graden doen bepaalde metaallegeringen van vorm veranderen. Tijdens de verandering van de koude naar de warme vorm kunnen deze materialen krachten uitoefenen en dus arbeid leveren. Het zal niet verbazen dat materialen met deze wonderlijke eigenschappen in de categorie 'high-tec' zijn ingedeeld en veel aandacht krijgen van industriële en universitaire researchlaboratoria. De materialen staan inmiddels bekend onder de naam vormgeheugenmetalen. Ze verschijnen meer en meer in de industriële en huishoudelijke omgeving, hoewel de kostprijs nog relatief hoog is.

METALEN MET GEHEUGEN

Jan Van Humbeeck
Katholieke Universiteit
Leuven

Een belangrijk toepassingsgebied voor geheugenmaterialen is de robotica. Draden van geheugenlegeringen kunnen in robots als het ware de menselijke spieren vervangen. Furukawa Cie, een Japanse multinationale onderneming, heeft zo een robotarm met vijfvingerige hand gemaakt. Deze arm bezit 17 (!) vrijheidsgraden, drie aan de pols en veertien aan de vingers. De handconstructie is vrij eenvoudig omdat alle bewegingen worden gerealiseerd door draden die zich door een temperatuurverandering over een bepaalde hoek plooiën. De beweging ontstaat als er een stroom door de draden wordt geleid. Tijdens deze opwarming zullen de draden een van te voren bepaalde vorm aannemen. Bij afkoeling neemt het materiaal de 'koude' vorm weer aan.

De vormverandering door temperatuurverschillen in geheugenmateriaal is het gevolg van een overgang tussen twee kristalvormen van de legering die als vormgeheugenmateriaal dienst doet. In de volgende paragraaf gaan we verder in op de structuur van het materiaal.

De martensietische transformatie

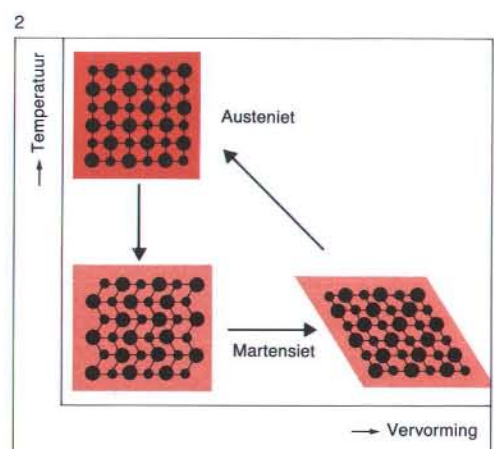
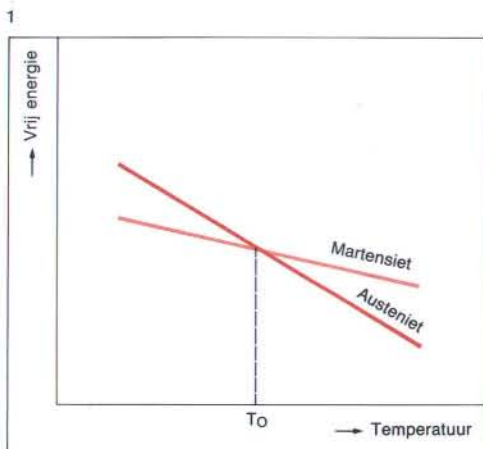
Metalen zijn over het algemeen kristallijne stoffen. Elk element en elke legering kan echter in meerdere kristalstructuren voorkomen, de overgangen van de ene naar de andere structuur worden vooral door de temperatuur bepaald. De overgangstemperatuur verschilt per legering.

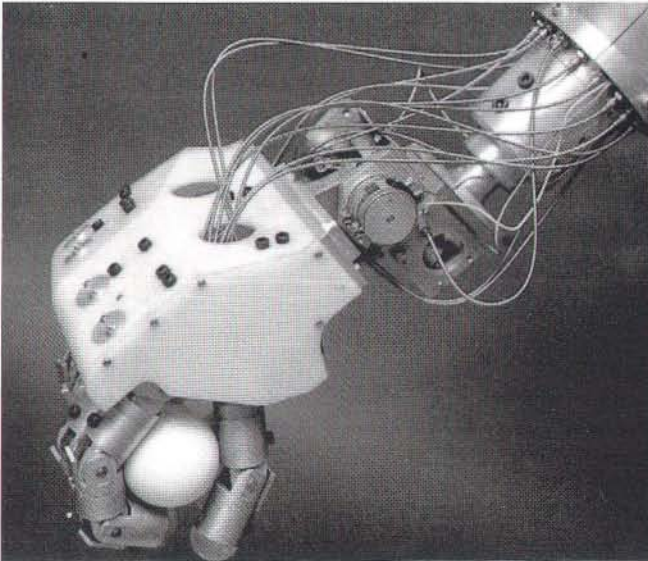
Elke kristalwijziging gaat gepaard met een herschikking van atomen, die dan vaak diffun-

deren over afstanden die veel groter zijn dan de interatomaire afstanden. De drijvende kracht achter een fasetransformatie is de vrije-energieverlaging. De structuur met de laagste energie bij een bepaalde temperatuur zal zich vormen (afb. 1).

De structuurovergang tussen *austeniet* en *martensiet*, de *martensietische transformatie* genoemd, is een speciaal geval van fasetransformatie, omdat zij vrijwel diffusieloos gebeurt. Bij de overgang verschuiven atoomlagen in het kristal iets ten opzichte van elkaar. Die verplaatsing van de atomen is kleiner dan de interatomaire afstand. Elk atoom behoudt zo zijn oorspronkelijke burens, maar op enigszins gewijzigde afstanden (afb. 2). De martensietische transformatie is vanouds bekend van staallegeringen. De martensietstructuur van staal heeft een hoge hardheid maar ook een hoge brosheid. Bij de staalproductie is het gehalte aan koolstof en andere metaalatonen dan ijzer van invloed op de overgangstemperatuur tussen austeniet en martensiet. Net zo varieert bij de legeringen die nu als vormgeheugenmateriaal in gebruik zijn, de ligging van het overgangsgedebied met de samenstelling van de legeringen.

Naast verschillende zelden gebruikte legeringen, zoals Au-Cd of In-Tl, vindt men de martensietische transformatie eveneens in Ni-Ti-legeringen bij bepaalde mengverhoudingen van Ni en Ti en bij enkele koperbevattende legeringen, in het bijzonder bij Cu-Zn-Al en Cu-Al-Ni. De laatste drie legeringssytemen zijn op dit ogenblik technisch de meest belang-





3

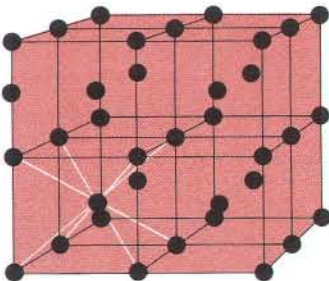
1. De fase met de laagste vrije energie bij een bepaalde temperatuur is dan stabiel. Bij de overgangstemperatuur (T_0) zijn beide fasen in evenwicht.

2. Martensiet ontstaat uit austeniet door afschuiving. De diffusie-afstand is kleiner dan de interatomaire afstand. Bij speciale vervorming, de re-oriëntatie, houden de atomen steeds dezelfde burens. Terugtransformatie naar austeniet zal dan de oorspronkelijke vorm herstellen.

3. De robotarm van Furukawa met 17 vrijheidsgraden beweegt met draden van vormgeheugenmateriaal.

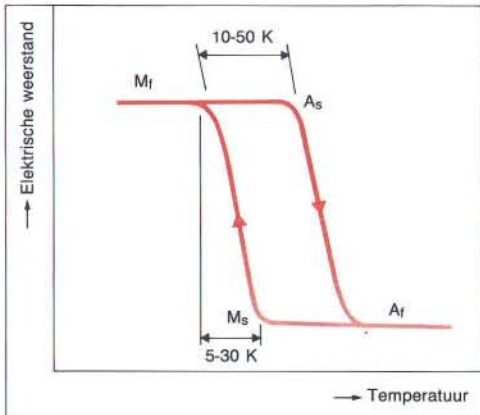
4. De atoomstapeling in de kubische ruimte gecentreerde fasestructuur: op de hoekpunten van iedere kubus zit één atoom. Precies in het zwaartepunt zit er nog één.

5. Meting van de elektrische weerstand als functie van de temperatuur geeft inzicht in het verloop van de martensietische transformatie.



4

5



rijke voor de toepassing van het vormgeheugeneffect. Bij hoge temperatuur hebben ze een stabiele *kubische ruimte gecentreerde fasestructuur* (krf) (afb. 4), die bekend staat als de austeniet- ofwel bètafase. Bij langzaam afkoelen zal de bètafase door diffusie ontbinden in een alfa- en gammafase, waardoor de martensietische transformatie niet meer plaatsvindt. In de vaste toestand is een vlotte diffusie echter slechts mogelijk bij hogere temperaturen. Wanneer nu de austenietfase voldoende snel wordt afgekoeld, een bewerking die *afschrikken* wordt genoemd, kan de krf-fase bij lage temperaturen, bijvoorbeeld rond kamertemperatuur, als het ware ingevroren worden. De krf-fase doet zich dus bij deze temperaturen stabiel voor, ze is echter metastabiel. Bij verder langzaam afkoelen neemt het materiaal de martensietstructuur aan. Het zo ontstane materiaal is het uitgangspunt voor ons geheugenmetaal.

Overgangstemperaturen en hysteresis

Belangrijke kenmerken van de martensietische transformatie zijn de overgangstemperaturen. Dit zijn de temperaturen waarbij de transformatie aanvangt en eindigt, zowel bij opwarmen als afkoelen. Tijdens het afkoelen begint het martensiet zich te vormen bij de tempera-



6

6. Het gebruik van vormgeheugenlegeringen valt nog nauwelijks op. Meestal zijn het maar kleine onderdeeltjes die van het metaal worden gemaakt. Deze Japanse VW is niet van vormgeheugenmateriaal gemaakt, na een botsing is verhit en dus niet afdoende om de oude vorm te herstellen. De mistlampen van deze auto zijn voorzien van beschermende jaloezieën die met behulp van geheugenmateriaal veren worden geopend en gesloten.

7. Boven de horizontale as is de grootte van de kracht uitgezet die nodig is om een bepaalde vervorming A_c te bereiken. Onder de horizontale as is aangegeven hoe de vervorming verdwijnt bij verhoging van temperatuur.

tuur M_s . Om het materiaal volledig te laten transformeren dient verder gekoeld te worden tot een temperatuur M_f wordt bereikt. Wanneer er vanaf een temperatuur lager dan M_f opgewarmd wordt, zal het martensiet beginnen zich om te zetten tot austeniet bij een temperatuur A_s . De transformatie is volledig bij de temperatuur A_f . Het is belangrijk op te merken dat de afkoel- en opwarmkromme elkaar niet bedekken maar ten opzichte van elkaar verschoven zijn. Dit noemt men het *hysteresiseffect* en speelt bij vormgeheugentoepassingen soms een gewenste, vaak een eerder ongewenste rol. Zonder uitwendige ingrepen bedraagt deze hysteresis 10 tot 50 graden. Afbeelding 5 toont de grootte van het temperatuurgebied waarbinnen de reversibele transformatie zich voordoet. Dit traject omvat ongeveer 20 tot 60 graden, wat erg belangrijk is voor toepassingen.

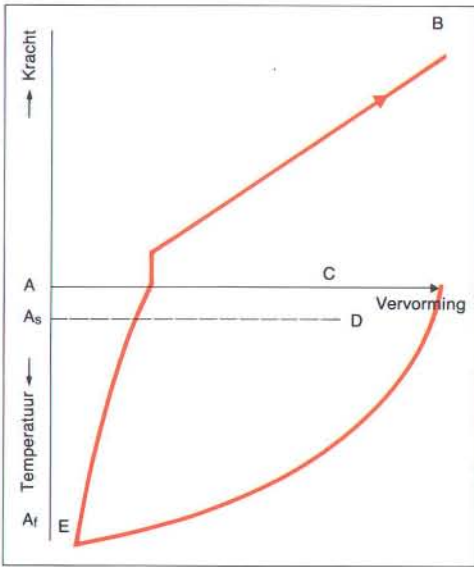
Twee belangrijke parameters die de waarde van de overgangstemperaturen bepalen zijn de *samenstelling* van de legering en de eventueel aangelegde *spanning*. Door variaties van de verhouding tussen de elementen kan zowel in Ni-Ti- als in Cu-Zn-Al-legeringen het transformatiegebied vrij gekozen worden tussen het absolute nulpunt en ongeveer 100°C. Bij Cu-Al-Ni-legeringen bedraagt het maximum zelfs 180°C. Elke langs één kristallas aangelegde

kracht, zowel druk als trek, zal de transformatietemperaturen doen verschuiven naar hogere waarden, evenredig met de waarde van de aangelegde kracht. Zoals we verder zullen beschrijven ligt deze laatste eigenschap ten grondslag aan het arbeidsleverend vermogen van vormgeheugenlegeringen.

Vormgeheugeneffect en martensietovergang

Door de vrijwel diffusieloze overgang tussen austeniet- en martensietstructuur blijft het verband tussen de twee kristalroosters bewaard. Daardoor keert bij opwarmen het oorspronkelijke austenietrooster weer terug. Er is echter meer: uit één austenietrooster kunnen 24 verschillende varianten van het martensietrooster ontstaan (afb. 8).

Wanneer martensiet onder invloed van aangelegde krachten wordt vervormd, doet er zich in de beginfase van de vervorming een proces voor dat *reoriëntatie* genoemd wordt. De roostervarianten die passen bij de aangelegde vervormingsrichting zullen groeien ten koste van varianten die niet bij de vervorming passen. Van buiten is aan het nu verbogen materiaal niet te zien dat we hier met een bijzonder geval te maken hebben. Het stukje verbogen metaal ziet er net zo uit als ieder ander stukje verbogen metaal. Belangrijk is echter dat we

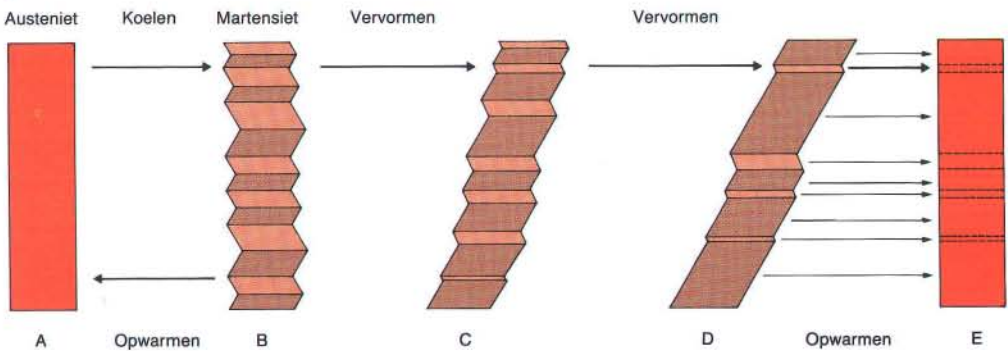


7

bij vervormd geheugenmateriaal tot een bepaalde maximumverbuiging op atomaire schaal nog steeds een martensietrooster hebben, dat een variant is die voortkwam uit het moederrooster in de austenietvorm en daar bij verwarming ook weer in zal terugkeren. Dat is nu precies de geheugenfunctie van het materiaal. Bij een willekeurig stuk staal of ijzerdraad zal dit niet gebeuren, daarbij is de vervorming microstructureel irreversibel omdat de roosterovergangen geel anders liggen.

Duidelijk zal zijn dat men er bij de vervorming van martensiet wel voor moet zorgen dat de vervorming beperkt blijft tot het gebied waarin reoriëntatie nog mogelijk is. Alleen dan zal het rooster zowel voor als na de vervorming nog steeds het produkt zijn van eenzelfde moederfase en bij opwarmen naar zijn oorspronkelijk austenietrooster terugkeren. Hierdoor lijkt het erop dat het materiaal zich

8



9



8. Een materiaal met de austenietstructuur (A) gaat bij afkoelen over in een martensietstructuur (B). Bij vervorming ontstaat een roostervariant (D) die toch nog hetzelfde moederrooster heeft. Dat blijkt bij opwarmen (E).

9. In laboratoria moeten stoffen dikwijls gedroogd worden zonder ze op te warmen. Daarvoor bestaan droogstoven met een hygroscopische stof, bijvoorbeeld silicaagel. Als dit veel vocht heeft opgenomen kan het worden gedroogd door verhitting. In een nieuw type droogstoof sluit een luikje tussen monster en silicaagel en gaat een luikje naar de buitenlucht open, zodra het verhittingselement wordt aangeschakeld. Het openen en sluiten gebeurt door veren uit geheugenmateriaal.

zijn oorspronkelijke vorm herinnert, vandaar de zeer toepasselijke naam vormgeheugen.

Eénwegs- en tweewegs-geheugeneffect

Het zojuist beschreven effect noemt men het *éénwegs-geheugeneffect*, omdat het materiaal zich alleen zijn 'warme' vorm kan herinneren. Het materiaal in de koude vorm moet worden verbogen en is onvermijdelijk verbonden met de roostertransformatie. De opgelegde vervorming moet dus beperkt blijven tot het reoriëntatiegebied. Verdere vervorming zou irreversibele plastische veranderingen opleveren waarna bij verwarming het éénwegsgeheugeneffect slechts gedeeltelijk optreedt. De opgelegde vervorming mag daardoor slechts enkele procenten reële rek bedragen.

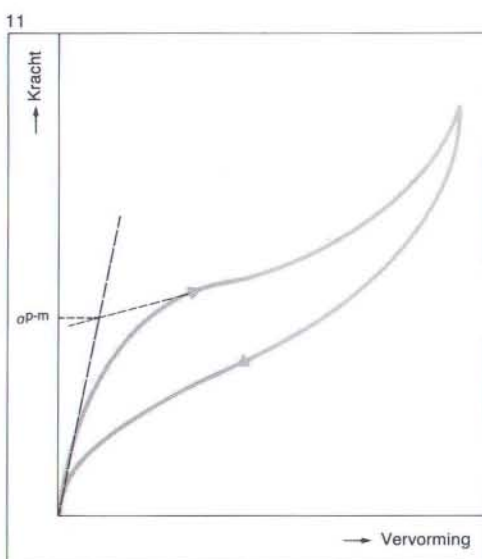
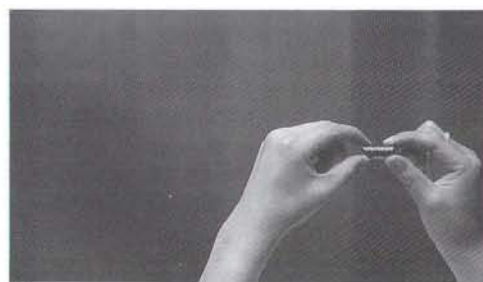
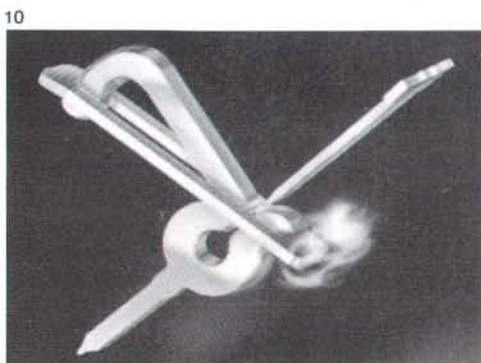
Er is echter nog een effect waar we gebruik van kunnen maken. Het proces van buigen, verwarmen en afkoelen dat het éénwegs-geheugeneffect bepaalt, laat sporen in het materiaal na in de vorm van *defecten* in het kristalrooster. Door het proces verschillende malen te herhalen krijgen deze defecten een vaste plaats in het rooster en hun aantal neemt toe tot een zekere verzadiging is bereikt. Hiervan kan men nuttig gebruik maken en geheugenmaterialen krijgen er nieuwe en nog onvermoede eigenschappen van.

Wanneer men de vervorming van een stuk geheugenmateriaal steeds herhaalt, en ervoor zorgt dat de opgelegde vervorming steeds dezelfde is, raken de roosterdefecten strikt gelokaliseerd. Bij de selectie, de groei en de grootte van de martensietvarianten die tijdens koelen

10. Een detail van stekker en contrastekker die we bij chipbehuizingen vinden. Door ze van geheugenmateriaal te maken, staat de stekker bij afkoelen open en kan de chip makkelijk worden geplaatst.

11. Bij de kritische spanning σ_{P-m} start de martensietische transformatie bij de omgevingstemperatuur.

12, 13 en 14. Een veer uit geheugenmateriaal kan ogenschijnlijk zeer ver worden uitgerekt, maar dan toch weer in zijn oorspronkelijke toestand terugkeren. Dit komt door de superelastische eigenschappen van vormgeheugenmaterialen.



ontstaan, spelen zij vervolgens een dominerende rol. Men kan zich wel voorstellen dat bij herhaald vervormen, opwarmen en afkoelen de ontstane defecten van dien aard zijn dat tijdens het koelen uit de austenietstructuur onmiddellijk de martensietvariant ontstaat die door de opgelegde vervorming gecreëerd was. We zien dan dat het materiaal zich niet alleen zijn oorspronkelijke vorm in de 'warme' toestand herinnert, omdat dan de oorspronkelijke moedervorm van het austenietrooster wordt aangenomen; ook de 'koude' vorm wordt herinnerd en gelijk aan de door herhaalde verbuiging vastgestelde vorm. Het zijn de opgetreden roosterdefecten die het materiaal in een zeer bepaald martensietrooster dwingen. Na ongeveer 20 koel-, buig- en opwarmcycli is de vormverandering reversibel. Daarna neemt het

spanning waarbij dit effect optreedt is lineair evenredig met de temperatuur en neemt toe met ongeveer 2 MPa per graad Kelvin in polykristallijn materiaal. Wanneer een materiaal nu wordt vervormd bij een temperatuur boven A_f , waar de austenietstructuur stabiel is, zullen bij overschreden transformatiespanning de martensietvarianten groeien die energetisch het best volgens de aangelegde vervormingsrichting zijn georiënteerd. In éénkristallen met de meest gunstige oriëntatie kan het materiaal op die manier tot 10% rek vervormd worden. Wanneer na deze transformatieverlenging de trekkracht wordt weggenomen zal het materiaal terugkeren naar het oorspronkelijk austenietrooster, aangezien bij nulbelasting alleen dit rooster stabiel is boven de A_f -temperatuur. Het materiaal gedraagt zich dus alsof het

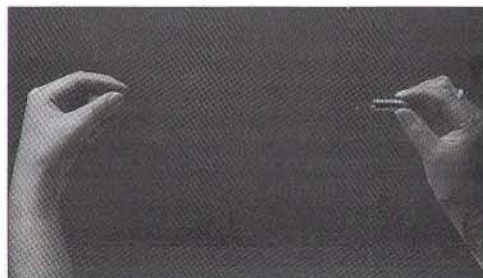


13

materiaal bij opwarmen en afkoelen over het temperatuurtraject van het transformatiegebied steeds zijn 'warme' respectievelijk 'koude' vorm aan. We beschikken dan over materiaal met een *tweewegs-geheugeneffect*.

Pseudo-elasticiteit

Zoals reeds eerder opgemerkt verschuiven de transformatietemperaturen evenredig met de grootte van een aangelegde uniaxiale kracht naar hogere waarden. Bij elke temperatuur boven de M_s -temperatuur bestaat er daarom een kritische spanning, σ^m genaamd waarbij de M_s -temperatuur gelijk wordt aan de omgevingstemperatuur. Daaruit volgt dat men door het toepassen van een uitwendige kracht ook bij constante temperatuur de martensiettransformatie teweeg kan brengen. De kritische



14

vrij makkelijk een stukje uitrekbaar is. Bij polykristallijne materialen is deze 'pseudo-elastische' vervorming beperkt tot enkele procenten, aangezien niet alle gekristalliseerde gebiedjes in het materiaal de meest gunstige oriëntatie hebben. Bij overbelasting zal het materiaal eerst plastisch vervormen en vervolgens breken.

Pseudo-elasticiteit en vormgeheugen

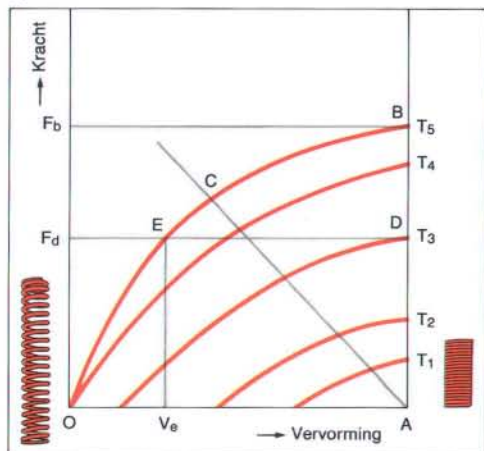
Aangezien de kritische spanning, waarbij de vervorming door roosterovergang plaatsvindt, afhankelijk is van de temperatuur, heeft iedere temperatuur een eigen spannings-vervormingscurve (afb. 15). We illustreren dit aan de hand van een 'getrainde' geheugenveer. Deze veer bezit het tweewegs-geheugeneffect; het is een zogenaamde drukveer die volledig gesloten is

in haar 'koude' vorm en open in haar 'warme' vorm (afb. 16). Gaan we uit van een begin-toestand in punt A met temperatuur A_s , dan zal de veer bij opwarmen tot T_1 en zo verder tot T_5 naar haar warme vorm groeien die in punt O uiteindelijk bereikt is. Aangezien nog geen druk op de veer wordt uitgeoefend 'beweegt' de vervorming, in dit geval volgens de horizontale as van de grafiek in afbeelding 15.

Wanneer men nu de temperatuur op T_3 constant houdt en druk op de veer uitoefent, dan geeft de curve T_3 het verband tussen de aangelegde spanning en de vervorming van de veer. Er is een kracht F_d nodig om de veer in haar gesloten vorm te krijgen.

We kunnen ook omgekeerd te werk gaan en de veer eerst inklemmen voor we gaan verwarmen. We fixeren de veer daartoe in toestand A. Haar vormverandering, als gevolg van het vormgeheugen, wordt dus belemmerd. Derhalve zal de veer tijdens opwarmen tot bijvoorbeeld temperatuur T_5 , een kracht ontwikkelen gelijk aan F_b . Laten we vervolgens de veer los, dan zal de veer de warme toestand innemen die beschreven is in punt O. Nadat de kracht wordt weggenomen treedt de vormverandering dus alsnog op. In het geval men een gewicht met massa F_d op de veer zou zetten zou men tijdens opwarmen vanaf A_s geen vormverandering waarnemen tot een temperatuur T_3 . Vervolgens tilt de veer het gewicht op volgens het traject Dc. Bij de temperatuur T_5 zal de veer dus gedeeltelijk ingedrukt zijn tot de waarde V_e .

15



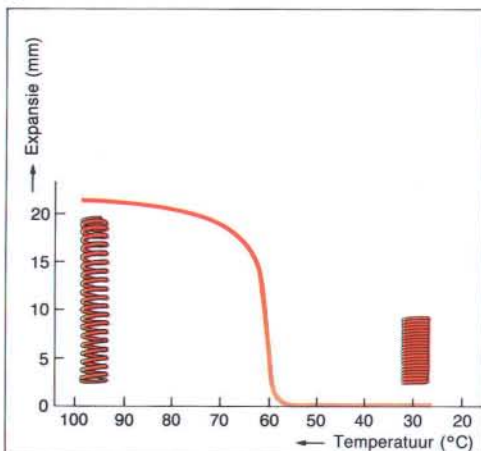
17

15 en 16. Een veer van geheugenmateriaal is niet alleen veer, maar kan ook krachten uitoefenen en van vorm veranderen als gevolg van het verkregen tweewegs-geheugeneffect (15). Isothermen in het kracht-vervormingsdiagram geven de temperatuurafhankelijkheid van het geheugeneffect aan.



18

16



17. Een metalen brilmontuur, gedeeltelijk van geheugenmetaal, heeft niet alleen voordelen bij het inzetten van de glazen. Het materiaal voorkomt door zijn superelastische eigenschappen ook dat bij extreme warmte de glazen uit het montuur vallen.

18. Een kookplaat die werkt volgens het principe van elektromagnetische inductieverhitting. Hierin is als temperatuurindicator een sensor van geheugenmateriaal ingebouwd.

19. Voor gebitsregulatie gebruikt de orthodontist tegenwoordig nikkel-titaniumdraad. In principe is dit een legering die als geheugenmateriaal te gebruiken is. In dit geval maakt men alleen gebruik van de superelastische eigenschappen die met de structuur samenhangen.

Toepassingen

De eerste publieke demonstratie van een Au-Cd-legering met vormgeheugen werd gegeven tijdens de wereldtentoonstelling van 1958 te Brussel. Pas de laatste jaren is er echter een groeiende commerciële markt ontstaan. Hiervoor zijn economische en technische redenen aan te wijzen. Bij de overgang van laboratoriumcuriosum naar een industrieel produkt botste men op vele problemen op het gebied van mechanische sterkte, spannings- en temperatuurgevoelige verouderingsverschijnselen en de stabiliteit van het effect. Er was nog intensief en kostbaar onderzoek nodig voor er in het afgelopen decennium materialen beschikbaar kwamen die commercieel bruikbaar zijn. Het langdurige ontwikkelingswerk heeft er wel toe geleid dat de know-how over geheugenmaterialen zich slechts bevindt in enkele gespecialiseerde laboratoria, hun spin-off bedrijven, of binnen enkele grote multinationale onderne-

19



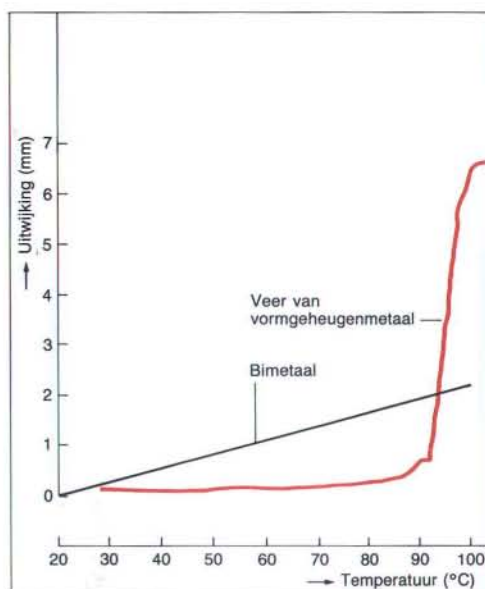
mingen. Japan loopt overigens voorop bij het ontwikkelen van toepassingen. Wat het economisch aspect betreft, is het vooral de hoge kostprijs van deze legeringen die belemmerend werkt. De dure produktiemethoden, de hoge eisen gesteld aan de diverse produktieparameters, gecombineerd met een aanvankelijk kleine vraag naar het produkt dragen ook het hunne bij aan een hoge prijs.

De laatste jaren is hier echter duidelijk verandering in gekomen. Door geoptimaliseerde produktiemethoden, de beschikbaarheid van computerprogramma's voor optimaal design en de toenemende vraag, is er een belangrijke kostprijsvermindering gerealiseerd. Als gevolg hiervan verwacht men nu dat de markt voor vormgeugenlegeringen sterk zal groeien.

De toepassingen zijn onder te verdelen in drie grote groepen. In stijgende volgorde van belangrijkheid zijn dit: de vervangingstoepassingen, de vereenvoudigingstoepassingen en de nieuwe toepassingen.

Vervangingstoepassingen zijn toepassingen waarin een geheugenelement een ander element van dezelfde complexiteit en met een analoge functie vervangt. Een klassiek voorbeeld hiervan is het bimetaal, dat vervangbaar is door een strip geheugenmateriaal. Een even belangrijk voorbeeld zijn de klemverbindingen (afb. 21). Dit soort verbindingen wordt reeds toegepast op moeilijk bereikbare plaatsen in hydraulische systemen of voor het koppelen van onderzeese kabels. De reversibiliteit van het effect is ook heel belangrijk bij het koppelen van buizen in toekomstige kernfusiereactoren. Grote delen van die reactoren raken radioactief besmet en als na een bepaalde gebruikstijd materialen beneden hun kwaliteits-eisen komen, moet alles op afstand worden afgebroken en vervangen. Het koppelen en ont-koppelen van op temperatuurveranderingen reagerende geheugenelementen biedt dan grote voordelen.

In een vereenvoudigingstoepassing vervangt men een complexe structuur door een 'eenvoudig' geheugenelement. Er zijn voorbeelden bekend waarbij een apparaat bestaande uit thermokoppel, versterker, relais, motor en elektrische voeding is vervangen door één enkele veer van geheugenmateriaal. Zo'n veer is in staat arbeid te verrichten bij een bepaalde gewenste temperatuur. Ze worden daarom bijvoorbeeld gebruikt voor het automatisch openen van

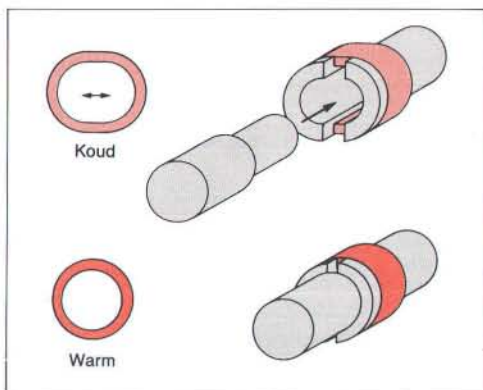


20

vensters of, belangrijker nog, voor het openen of sluiten van branddeuren of brandgordijnen. De constructie is eenvoudig en zal ook werken wanneer brand de elektrische installatie ontklaar heeft gemaakt.

Tenslotte zijn er de nieuwe toepassingen. Die zijn pas mogelijk geworden sinds geheugenmaterialen beschikbaar zijn. Ook hier kan men de bimetaalwerking noemen. Het vormgeheugenmetaal heeft namelijk een speciale temperatuurkarakteristiek, namelijk een steile verplaatsing over een klein temperatuurbereik. Bovendien bezit het de mogelijkheid een aanzienlijke hoeveelheid arbeid te leveren. Vooral in het geval van oververhittingspreventie kan dit belangrijk zijn. Het geheugenmateriaal verandert immers niet of nauwelijks van vorm tot de overgangstemperatuur (A_s in afb. 20) is bereikt, daarna zal het snel en gepast reageren.

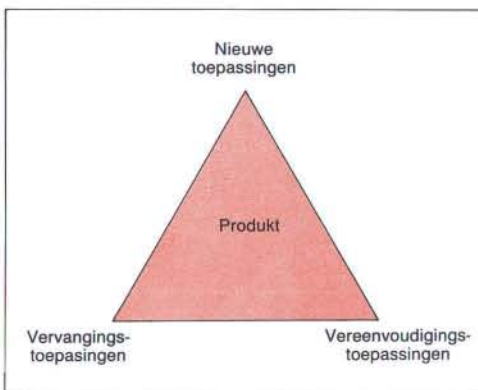
De genoemde voorbeelden hebben waarschijnlijk al duidelijk gemaakt dat een toepassing vaak in meerdere groepen valt. Vandaar dat men elk idee binnen de toepassingsdriehoek probeert te situeren (afb. 22). Hun positie daarbinnen is van belang voor de verwachte marktpositie. Voor nieuwe toepassingen zal vaak sneller een markt blijken te bestaan dan voor vervangingstoepassingen. Uiteraard zul-



21

20. Een vergelijking van de temperatuurkarakteristiek van een bimetaal en een vormgeheugenlegering. De beweging van het bimetaal verloopt evenredig met de temperatuurverhoging. Geheugenmetaal kent een kort overgangstraject.

21. Hechte elektrische verbindingen ontstaan met behulp van connectors waarin geheugenmetaal wordt toegepast.



22

In dit geval is het ringetje van een legering in koude toestand wijd en bij bedrijfstemperatuur samengesloten. Met behulp van wat vloeibare stikstof zijn zo zeer stabiele verbindingen te maken.

22. Produkten met geheugenmateriaal zijn altijd ergens binnen de toepassingsdriehoek te situeren. Hun plaats daarin zegt iets over hun marktwaarde.

len de vereenvoudigingstoepassingen ook vaak snel gretig aftrek vinden.

Toepassingen vindt men momenteel vooral op het gebied van de brandveiligheid en -detectie, van verbindingen en koppelingen, maar ook al in de kledingindustrie en de medische wereld. Er zijn bovendien talrijke ontwerpen van motoren die slechts koud en warm water als 'brandstof' gebruiken. Door het zeer lage energierendement van 1 à 2% is het gebruik van deze motoren voorlopig beperkt tot boeiende studieobjecten. Overigens wordt van deze motoren wel veel verwacht op plaatsen waar directe warmte-energie gratis beschikbaar is. Indien dit gecombineerd kan worden met een efficiënte koudebron zouden bijvoorbeeld pompsystemen in afgelegen dorre gebieden interessante mogelijkheden bieden.

Over het vormgeheugen is zeker nog niet alles gezegd en verklaard. Er wordt gezocht naar nieuwe legeringssysteem met hogere overgangstemperaturen. Enkele ijzerbevattende legeringen lijken hier interessante mogelijkheden te bieden. Soms komen nieuwe ontwikkelingen ook uit een onverwachte hoek, zoals uit die van de nieuwe hoge-temperatuursupergeleiders die dit effect zouden kunnen manifesteren in hun kritisch temperatuurgebied. Maar dat is dan weer een ander verhaal.

De auteur draagt dit artikel graag op aan prof dr ir L. Delaey, hoofd van de Fysisch Metaalkundige Groep van het Departement MTM (Metaalkunde en Toegepaste Materiaalkunde) van de Katholieke Universiteit Leuven. Zijn wetenschappelijk werk is van bijzondere betekenis geweest voor de ontwikkeling van de koperhoudende vormgeheugenlegeringen. Zijn enthousiasme heeft niet alleen de auteur van dit artikel met een boeiend onderzoeksgebied kennis laten maken.

Bronvermelding illustraties

Furukawa Electric Co./Thomas Bolton & Johnson Ltd., Stoke-on-Trent, Engeland: no. 3, 6, 9, 12, 13, 14, 17, 18, 19.

Raychem GmbH, Ottobrunn bei München, BRD: 10. De overige illustraties zijn afkomstig van de auteur.

Onder redactie van ir. S. Rozendaal.

Vechten om een bot

■ Simon Rozendaal ■

Wetenschap is mensenwerk. In dat korte zinnetje ligt een grote paradox besloten. Wetenschap roept een onpersoonlijke associatie op: de *Speurtocht naar de Waarheid*. Hoe zit de natuur in elkaar? Hoe is de kosmos ontstaan? Wat is leven? Tegelijkertijd wordt die wetenschap bedreven door mensen en wordt dus per definitie vatbaar voor de menselijke zwakheden: de neiging zich op de voorgrond te dringen, jaloezie als anderen meer waardering krijgen, onzekerheid, schuld en schaamte over het eigen functioneren.

In elke wetenschapsdiscipline botsen deze twee werelden – de onpersoonlijke wereld van het zoeken naar en het persoonlijke van het vinden van. Wie de wetenschap van nabij kent, weet dan ook dat achter conflicten tussen onderzoekers die officieel alleen om een theoretisch verschil van inzicht gaan, altijd persoonlijke tegenstellingen schuilgaan. Je hoeft bijvoorbeeld alleen maar even de Fransman Luc Montagnier en de Amerikaan Robert Gallo te observeren en je begrijpt waarom die twee in conflict raakten over de ontdekking van het AIDS-virus: tegengesteld persoonlijkheden zijn nauwelijks denkbaar.

De afgelopen decennia ontstaat er ook wetenschappelij-

ke belangstelling voor dit aan research inherente dilemma. De wetenschapssociologie handelt hier zelfs grotendeels over en ook in de wetenschapsfilosofie staat men er regelmatig bij stil. En wanneer men tegenwoordig een college 'Wetenschap en Samenleving' loopt, is de kans

We zien de zaken niet zoals ze zijn, we zien ze zoals we zijn

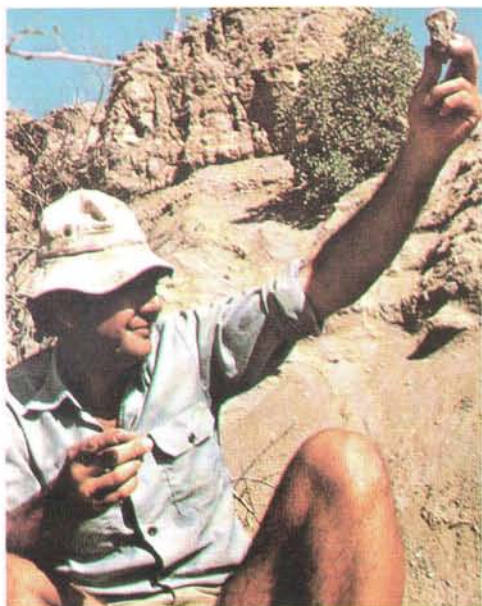
groot dat men deze relativeering al in de ransel heeft voor men het laboratorium binnengaat. Zo heeft Arie Rip, inmiddels hoogleraar in Twente, eens een helder boekje over dit grote wetenschappelijke dilemma geschreven onder de titel 'Wetenschap als mensenwerk.'

Toch wordt in de reguliere wetenschap nog steeds zorgvuldig de notie gekoesterd dat de rol van de observator er niet toe doet. Belangstelling voor de mensen die de wetenschap beoefenen kan in die kringen nogal eens het verwijt van een al te populaire opstelling opleveren.

Dat het mogelijk is om objectief het denken in een bepaalde discipline te belichten, en

er op te wijzen dat menselijke zwakheden de wetenschapsbeoefening en ook de wetenschappelijke resultaten zelf kleuren, wordt bewezen in het boek 'Bones of Contention' van Roger Lewin. Dat gaat over *paleoantropologie* – de discipline die zich bezighoudt met het bestuderen van fossielen van mensapen, aapmensen en voorlopers van de huidige mens. Lewin is een Engels biochemicus die wetenschapsjournalist is geworden en voor de *New Scientist* en *Science* heeft geschreven. Hij vertegenwoordigt in optima forma de Angelsaksische traditie in de wetenschapsjournalistiek, waarop we in Nederland en België nog steeds afgunstig dienen te zijn: mensen die bereid zijn zich grondig in een vakgebied te verdiepen, met zoveel mogelijk onderzoekers te praten, die uitstekend kunnen schrijven en denken en die, tenslotte, oog hebben voor het feit dat wetenschap mensenwerk is.

De paleoantropologie leent zich uitstekend voor deze benadering. Ogenscheinlijk heeft zij met de 'harde' disciplines fysica en chemie gemeen dat de onderzoekers doede materie in een laboratorium bestuderen, in plaats van levende mensen die zich in een onderzoekssituatie altijd anders gedragen dan in het wild. Toch is dit maar schijn. Die



Don Johanson en Mary Leaky: conflicten.

dode materie, dat is namelijk onze voorgeschiedenis en de paleoantropoloog die een schedel in zijn hand houdt denkt onwillekeurig: misschien, als ik terugga in mijn eigen stamboom, kom ik wel bij deze schedel uit.

Daarom spelen bij de paleoantropologie menselijke emoties een rol. In wezen gaat het over de relaties tussen mensen en apen en wat daar vroeger tussen in zat (de *missing link*). Lewin maakt duidelijk dat deze emotionele lading ook de nuchtere bestudeerders van fossielen niet ongemoeid laat.

Voeg daarbij typische aspecten van deze discipline, zoals het fossielen zoeken in exotische landen, waar niet elke onderzoeker zomaar aan de slag kan, en er ontstaat een dynamische cocktail van objectieve nieuwsgierigheid, naijver en intrigerende persoonlijkheden.

Controverses

De term 'bones of contention' is voor het eerst gebruikt door de antropoloog John Napier die zei: "Practisch alle paleoantropologische ontdekkingen kunnen beschreven worden als bones of contention": strijdbeenderen, botten waarom getwist wordt. Het lijkt wel of er in de paleoantropologie meer controverses zijn dan in andere wetenschapsdisciplines, zo constateert Lewin. Waarom? Als antwoord laat hij de evolutiebioloog Ernst Mayr spreken: "Menselijke wezens zijn niet in staat om over zichzelf en hun geschiedenis te praten zonder op de een of andere manier emotioneel te worden." En de curator van het National Museum of Natural History in Washington zegt dat het bestuderen van aapmensachtige fossielen iets geheel anders is dan het bekij-

ken van oude stenen of resten van uitgestorven paarden. "Zodra het om fossielen gaat die een rol spelen in de relatie tussen mensen en apen wordt het een ander verhaal."

Onderzoekers krijgen dan klaarblijkelijk de neiging om zich een handvol botjes intellectueel toe te eigenen, ze een nieuwe soortnaam te geven en de theorie over de afstamming van de mens vervolgens iets te wijzigen. Vanaf dat moment ontstaat de situatie dat men de opvatting die met een bepaalde vondst samenhangt, verdedigt als ware het de eigen voorkeur. Zoals iemand eens zei over de Nederlander Eugène Dubois, die *Pithecanthropus erectus* in Java ontdekte aan het eind van de vorige eeuw: "*Pithecanthropus* werd Dubois' doel in het leven. Het was zijn ontdekking, zijn schepping, zijn exclusieve bezit; op dit punt was hij net zo onaanspreekbaar

als een jaloerse geliefde. Iedereen die het niet eens was met zijn interpretaties van *Pithecanthropus*, beschouwde hij als een persoonlijke vijand."

Dergelijk gedrag vertonen paleoantropologen regelmatig, zo toont Lewin in zijn boek aan. Er zijn verschillende beroemde controverses over botten en schedels die aldus kunnen worden verklaard: over het Taung-kind, over *Ramapithecus*, over de KSB-tufsteenlaag en de discussie tussen Don Johanson en Mary en Richard Leaky over het Lucy-skelet.

Dit probleem ontstaat ook omdat er in dit wetenschapsgebied een ongeschreven regel is, dat de ontdekker van een nieuwe missing link er zelf een naam voor mag bedenken en op deze wijze zelf ook een plaatsje in de galerij der beroemdheden verwerft. Zo is het fossiel Lucy dat in 1978 door Johanson werd ontdekt bekend als *Australopithecus afarensis*, Johanson, 1978.

Ook typisch voor deze tak van wetenschap is dat niet iedereen dat onderzoek kan doen wat hij of zij het liefst zou verrichten. Er zijn niet zoveel plaatsen in de wereld waar fossielen kunnen worden gevonden en er zijn niet zo heel veel fossielen die zo her en der in kluizen liggen opgeslagen. Of een onderzoeker ergens mag gaan graven, dan wel een schedel onderzoeken, hangt erg af van de juiste contacten en relaties. Het gevaar hiervan is vriendjespolitiek en het ontstaan van elkaar bevechtende kampen. Al in de jaren dertig waarschuwde de antropoloog Earnest Hooton voor de neiging om in een fossiel datgene te zien wat men hoopt te zien: "De tendens om een zeldzaam of uniek specimen grootser te maken voor de

vinder of de persoon die de vondst voor het eerst wetenschappelijk heeft beschreven, komt voort uit menselijk egoïsme en is bijna onuitroeibaar." En David Pilbeam, een hedendaags onderzoeker, zegt hetzelfde aan de hand van een Chinese spreuk: "*We do not see things the way they are; we see them the way we are.*"

Lewin: "Hoe is het mogelijk dat getrainde onderzoekers, de grootste experts uit hun tijd, naar een verzameling van botten van een moderne mens konden kijken en daar een duidelijke aapachtige signatuur in konden 'zien' en tegelijkertijd in een apenkaak de onmiskenbare tekens van menselijkheid 'zagen'?"

Iedereen die het niet met zijn interpretaties van *Pithecanthropus* eens was, beschouwde hij als zijn persoonlijke vijand

Eén van de aardigste voorbeelden daarvan is de Pilt-down Man, een fossiel dat in Engeland is gevonden en dat de gemoederen der paleoantropologen een halve eeuw in beweging heeft gehouden tot duidelijk werd dat het een vervalsing was: de schedel van een moderne mens plus de kaak van een oerang oetan, waarvan de tanden en kiezen waren bijgevoegd.

Een vergelijkbaar verhaal geldt voor *Ramapithecus* — in 1961 nog beschouwd als de belangrijkste missing link tussen mens en aap en tegenwoordig gezien als een familielid van de oerang oetan.

Op basis van de vergelijking van eiwitten van mensen en mensapen kwamen biochemici tot de conclusie dat de gezamenlijke voorouder van zowel mens als mensaap 'maar'

Eugène Dubois (staand), 'schepper' van *Pithecanthropus*. Geheel rechts: een opgegraven schedel des aanstoets.



enkele miljoenen jaren oud was, in plaats van de tientallen miljoenen jaren zoals de paleoantropologen dachten. Voor de bestudeerders van fossielen was dit een schok: daar waren opeens jongens in witte jassen die het lef hadden om te beweren dat al die gerespecteerde wetenschapsmensen het bij het verkeerde eind hadden. Onmogelijk.

Helaas, de paleoantropologen moesten er aan geloven. Grappig is dat ze hun ongelijk op een uiterst menselijke manier toegaven. Eerst begonnen ze hun schattingen langzaam maar zeker te verschuiven. Intussen bleef men dapper volhouden dat de biochemici het met hun 5 à 8 miljoen jaar volledig fout hadden. Vervolgens, nadat de bewijzen uit de biochemische hoek steeds sterker werden, verschoven de schattingen nog verder, totdat gerenommeerde paleoantropologen opeens van de ene dag op de andere overstag gingen en tevens vergaten dat ze vroeger een andere opinie aanhingen.

De Leakeys

¶ Een belangrijke rol spelen – hoe kan het ook anders – de Leakeys, de beroemde familie van vader Louis en moeder Mary plus hun drie zonen, waarvan vooral Richard ook een beroemde fossiënvinder is geworden. Het is een familie met een zelfde soort betoverende uitstraling als de Kennedy's – aristocratisch met een bohémienachtige toets, met hun verzameling Dalmatiërs reizend door de binnenlanden van Centraal Afrika. De Leakeys waren de ongekroonde koningen van de paleoantropologie en het nummer van Time-magazine dat destijds Richard Leakey met schedel 1470 op de omslag had, is nog steeds een hoogtepunt in de losse verkoop van dit in de hele wereld verkrijgbare tijdschrift.

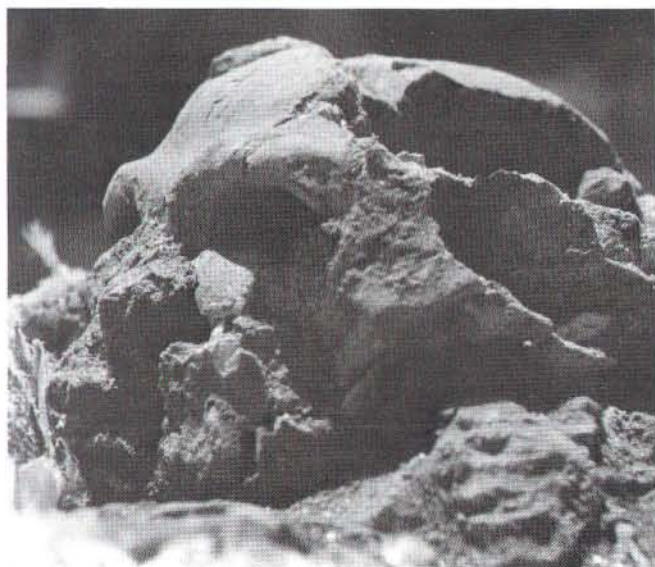
Toen vond Don Johanson in 1978 Lucy, het skelet van een vrouw die 3 à 4 miljoen jaar geleden leefde en die nu, als *Australopithecus afarensis* wordt beschouwd als de voor-

ouder van alle mensachtigen. Dit zette, althans in de VS, Don Johanson plotsklaps op hetzelfde voetstuk waar Mary Leakey en Richard Leakey al stonden.

Was dat op zichzelf misschien al voldoende reden voor een conflict, er kwamen ook nog wat vervelende voorvallen bij. Johanson sprak in mei 1978 in Stockholm op een Nobelsymposium over Lucy en gebruikte daarbij onderzoeksresultaten van Mary Leakey, zonder aan haar gevraagd te hebben of het mocht en ook voordat zij zelf zou spreken. Het lijkt een onbelangrijk detail, maar werd de aanleiding tot een hoog oplopend conflict.

Het bijzondere van Lewins boek is dat je nergens de indruk krijgt dat het de auteur alleen maar om roddel en achterklap is te doen. Voortdurend is de rode draad de wetenschap zelf. Voorzover er controverses aan de orde komen gebeurt dat aan de hand van citaten van de desbetreffende onderzoekers. Aldus ontstaat een combinatie van verduidelijken van een vakgebied voor geïnteresseerde leken, plus het belichten van de wereld achter de fossielen. Aldus benadert Lewin een journalistiek ideaal: zijn boek is niet alleen zeer de moeite waard voor niet-ingewijden, maar getuige de vele lovende citaten van gerenommeerde paleoantropologen op de achterflap, ook voor de wel-ingewijden.

Lewin Roger, *Bones of Contention. Controversies in the search for human origins*. New York: Simon & Schuster, 1987.



Een biotechnologische perestrojka

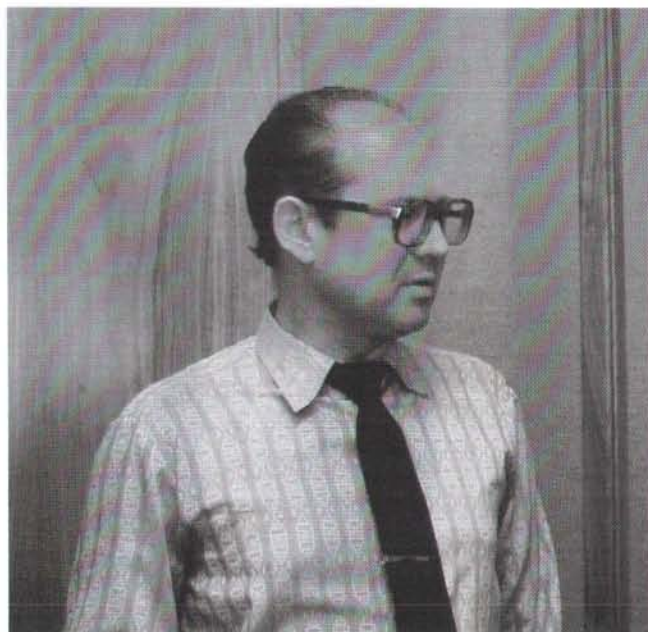
■ Joost van Kasteren ■

In een klein straatje, nabij de metrohalte Park Kultura, beter bekend als Gorki Park, zien we een klein, wat vervallen Russisch-orthodox kerkje. De plaat op de deur meldt in het Russisch, dat zich hier een deel bevindt van 'VniBio-tech', de staatsorganisatie voor de biotechnologie. Het is zondag. Het kerkje dat het ooit van deze dag moest hebben is nu dicht, want zelfs in de Sovjetunie wordt op zondag niet gewerkt.

Enkele dagen later staan we voor een indrukwekkend gebouw in één van Moskou's slaapwijken. Bij de ingang staat een stilistische weergave van het aminozuur valine. Op de gevel in beton een impressie van de dubbele DNA-helix. Vergissing is uitgesloten. In dit gebouw staat de moleculaire biologie centraal.

Eenmaal binnen overvalt ons een gevoel van vervreemding. Wie wel eens in een laboratorium is geweest kent de smalle gangen en kleine kamers, waarin de onderzoekers meestal werken en de geur van voedingsbodems en organische oplosmiddelen die laboratoria van onder tot boven doortrekt.

Niets van dat alles in het Shemyakin Instituut voor Bio-organische Chemie. Marmer is een veelgebruikt bouw-materiaal in de Sovjetunie, dus van het marmer op de vloer en tegen de wanden slaan we al niet meer achterover. Wel opvallend is dat de



vloeren bedekt zijn met Aziatische tapijten. Delen van de wand zijn bekleed met een eikenhouten lambrizing. De afmetingen van gangen en trappen doen denken aan de paleizen van de tsaar.

In een verbindingsgang tussen administratiegebouw en laboratoria ligt een prachtige winter-tuin. De laboratoria zijn voorzien van de modernste apparatuur. Gaschromatografen, NMR, gen-synthesemachines, stoven, centrifuges, computers; alles lijkt gloednieuw, pas de vorige week uit het Westen geïmporteerd.

Achterstand

■ In de jaren veertig en vijftig van deze eeuw heeft het biologisch onderzoek in de Sovjetunie een grote achterstand opgelopen door de steun vanuit de politiek aan Trofim Denisovitch Lysenko (1898-1976). Lysenko meende dat eigenschappen van organismen geheel bepaald werden door de omgeving. Hij was een aanhanger van het *Michurinisme*, genoemd naar de plantenkweker Michurin die op die manier de eigenschappen van zijn kruislingen probeerde te verklaren.

Lysenko genoot de bescherming van Stalin, die dank zij deze onorthodoxe genetica mogelijkheden zag om in één klap de problemen in de landbouw te overwinnen. "Het was een beschamende periode voor ons", aldus één van onze gesprekspartners die ondanks de 'glasnost' liever anoniem wil blijven. "De wetenschap werd bepaald door de grootste schreeuwer, niet door het experiment." Op het hoogtepunt van zijn politieke macht kon Lysenko zelfs beweren dat tarweplanten, mits onder de juiste omstandighe-

den gekweekt, rogge voortbrachten.

Aan het eind van de jaren vijftig nam de kritiek op Lysenko toe; zijn macht bij

richt. Waarnemend directeur prof V.T. Ivanov nu: "De oprichting van dit instituut, het latere Shemyakin Instituut, is indertijd gebeurd om

□

Op het hoogtepunt van zijn politieke macht kon Lysenko beweren dat tarweplanten rogge konden voortbrengen

□

Chroesjtsjov was tanend omdat spectaculaire successen uitbleven. In 1959 werd het Instituut voor de Chemie van Natuurlijke Produkten opge-

de problemen in de biologie (het Lysenkoïsme, JvK) te omzeilen." Gevraagd of de geest van Lysenko nog rondwaart, zegt Ivanov dat de

Links: Prof. V.T. Ivanov (Foto: Joost van Kasteren).

Onder: Het speuren naar nieuwe biotechnologische producten (Foto: NKI, Amsterdam).



Sovjetunie de laatste decennia erin is geslaagd om de kloof met de Westerse genetica en biochemie van meer dan twintig jaar te overbruggen. Weliswaar zijn er op het ministerie van Landbouw nog enkele Lysenkoïsten aanwezig, maar zij sterven gaandeweg uit en hun invloed is thans gering.

Voortrekker

¶ Na een periode van vooral biochemisch onderzoek, onder meer naar membranen en de relatie tussen structuur en functie bij eiwitten, is de Sovjetunie halverwege de jaren zeventig op de biotechnologietrein gesprongen. Voortrekker hierbij was Yuri Ovchinnikov, een van de vice-presidenten van de Sovjet Academie van Wetenschappen. Tijdens de Biotech-conferentie in Londen in 1982 hield Ovchinnikov in de Sovjet-ambassade een aanstekelijk betoog over het belang van biotechnologie voor de Sovjetunie. Dank zij de moderne biologische technieken zou de landbouw een hernieuwde basis kunnen vormen voor de Sovjet-economie.

Blijkbaar is Ovchinnikov er sinds die periode in geslaagd zijn enthousiasme over te brengen op de leiders van de Sovjetunie, iets dat niet alleen tot uiting komt in de uiterst luxe voorzieningen van het nieuwe Shemyakin Instituut, maar ook in een nationaal onderzoeksprogramma waarbij een kleine 150 biotechnologische instituten zijn betrokken. In februari van dit jaar is Ovchinnikov na een langdurig ziekbed overleden. Ivanov, onze gesprekspartner in het Shemyakin Instituut, is één van de kandidaten voor zijn opvolging.

Het Nationaal Programma voor Biotechnologie voorziet onder meer in samenwerking

tussen instituten van de Academie en de ministeries van Landbouw en van Medicijnen en Microbiologie. Deze ministeries hebben elk hun eigen onderzoeksinstituten. Die samenwerking is noodzakelijk, aldus Ivanov, om een snelle doorstroming van de resultaten van onderzoek te realiseren.

Daarnaast bestaat er ook een samenwerkingsverband van bedrijven, voornamelijk fermentatiebedrijven. Verder heeft het ministerie enkele bedrijven gesticht, puur gericht op het nationaal onderzoeksprogramma. Zo is er in Letland een bedrijf opgericht voor de produktie van *restrictie-enzymen*. Ook heeft men een bedrijf voor het ontwerpen en ontwikkelen van wetenschappelijke instrumenten en een bedrijf dat procesinstallaties ontwerpt voor de biotechnologische industrie. Het hele programma kost jaarlijks enkele miljarden roebels. Hoeveel precies wil Ivanov, die verder zeer open is en gemakkelijk communiceert, niet kwijt.

Onorthodox

¶ Bij het uit de grond stampen van een infrastructuur voor biotechnologie worden voor de Sovjetunie zeer onorthodoxe paden bewandeld. Zo is er een handelsbedrijf opgericht met de naam VnechBio. Dit bedrijf kan, zonder enige interventie van de overheid, direct met het Westen handelen. Ivanov: "Dat is voor ons de beste testmethode om na te gaan of we het goed doen. Als Westerse bedrijven onze produkten willen kopen, bijvoorbeeld één van onze meer dan 150 restrictie-enzymen, dan weten we dat we het goed doen."

Een ander opmerkelijk feit is dat vanaf dit begrotingsjaar

budgetfinanciering plaatsvindt voor het onderzoeksprogramma. Gebruikelijk is dat Sovjet-onderzoekers voor hun onderzoeksprojecten geld krijgen op basis van uitgebreide specificaties van het project en de kosten. Die financiering strekt zich uit over enkele maanden tot een half jaar, zodat onderzoekers bijna voortdurend 'proposals' aan het schrijven zijn voor ambtenaren. Dit jaar voor het eerst krijgt het nationaal onderzoeksprogramma biotechnologie een lump sum, waarvan de besteding achteraf verantwoord moet worden.

□ **Prof. Ivanov: "Als westerse bedrijven één van onze meer dan 150 restrictie-enzymen willen kopen, weten we dat we het goed doen."** □

De biotechnologie-activiteiten richten zich op vier deelgebieden. Als eerste noemt Ivanov de produktie van medicijnen, waarbij gebruik wordt gemaakt van genetisch gemanipuleerde organismen. Op dit moment zijn we zover, aldus Ivanov, dat het eerste medicijn, *alfa-2-interferon* klinisch wordt getest. Ook door bacteriën geproduceerd menselijk groeihormoon is in de Sovjetunie in de fase van klinische testen. De tweede generatie medicijnen, waaronder *interleukine-2*, andere *interferonen* en *tumor necrosis factor* (TNF) zijn in het stadium van produktontwikkeling. In de onderzoeksfase is alweer een derde generatie van medicijnen, waaronder *lymfokinen* en synthetische vaccins. Een tweede terrein van onderzoek is de biologische synthese van chemicaliën en oplos-

middelen. De chemische industrie in de Sovjetunie produceert grote hoeveelheden tamelijk eenvoudige stoffen, zoals azijnzuur. Net als onze chemische industrie heeft men zich in het jongste verleden vooral toegelegd op bulk-chemicaliën. In het kader van de intensivering van de Sovjet-economie (meer doen met eenzelfde hoeveelheid mensen en middelen) wil men zich gaan toeleggen op chemische specialiteiten. Daarbij is de biotechnologie een belangrijk hulpmiddel.

Een derde terrein van onderzoek is de ontwikkeling van instrumentatie en procestechnologie. Geen eenvoudige opgave gezien de enorme achterstand van de Sovjetunie op het gebied van computers en software. Niet voor niets is het Shemyakin Instituut uitgerust met Westerse apparatuur.

Rheuma

¶ Het vierde en laatste terrein waarop de aandacht wordt gericht, is de plantenbiotechnologie. Doel is om in celkweek van plantecellen allerlei zeldzame producten te produceren. Een voorbeeld van dergelijk onderzoek is de produktie van een alkaloid tegen rheuma.

Naast deze velden van onderzoek, waarvoor genetisch gemanipuleerde organismen veelal de basis vormen, werkt men aan de ontwikkeling en produktie van monoklonale antilichamen voor allerlei toepassingen. Zo zijn er testmethoden ontwikkeld, bedoeld om na te gaan of zaai- en pootgoed vrij is van ziektekiemen.

Eveneens ten behoeve van de landbouw wordt onderzoek gedaan naar de genetische manipulatie bij het veredelen van gewassen. Ivanov: "Voor

ons is dat een tamelijk nieuw terrein. Er wordt veel werk gedaan aan het genoom van planten." Gevraagd of het testen van gemanipuleerde planten in het vrije veld problemen oplevert, zegt Ivanov dat men nog niet in het stadium van veldtesten is. Hij verwacht wel problemen met de bevolking, vooral ook omdat de ecologische situatie in de Sovjetunie nogal verontwaardigend is. "Ik verwacht wel dat mensen, zij het op onjuiste gronden, protest aan zullen tekenen tegen dit soort veldexperimenten. Onze taak is om hen zo goed mogelijk uit te leggen wat het doel is van de experimenten en wat de eventuele risico's kunnen zijn. U en ik weten dat die vrijwel afwezig zijn, maar dat zullen we ook aan de omwonenden duidelijk moeten maken."

Al met al is men er in de Sovjetunie in geslaagd om in een vrij korte periode een omvangrijk programma voor biotechnologie van de grond te krijgen. Een programma dat enkele miljarden roebels per jaar kost en waarbij in totaal circa 10 000 mensen zijn betrokken. Een programma ook dat weinig gehinderd lijkt te worden door de gebruikelijke 'makke' van de Sovjet wetenschap, de te grote invloed van de bureaucraten. Voor mensen die onderzoek en ontwikkeling van biotechnologie per se willen zien als een race tussen landen, kunnen we constateren dat de Sovjetunie zowel qua wetenschappelijk onderzoek als qua resultaten, nog steeds achter ligt op het Westen. De enorme machinerie die nu in werking is, kan er voor zorgen dat die achterstand zeer snel wordt ingelopen.

NATUUR en TECHNIEK verschijnt maandelijks, uitgegeven door de Centrale Uitgeverij en Adviesbureau B.V. te Maastricht.

Redactie en administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland:

Postbus 415, 6200 AK Maastricht.

Telefoon: 043-254044*.

Voor België:

Tervurenlaan 32, 1040-Brussel.

Telefoon: 00-3143254044.

Bezoekadres:

Stokstraat 24, Maastricht.

Advertenties:

R. van Eck: tel. 043-254044.

De Centrale Uitgeverij is ook uitgever van de Cahiers van de Stichting Bio-Wetenschappen en Maatschappij.

Abonnees op Natuur en Techniek of studenten kunnen zich abonneren op deze cahiers (4 x per jaar) voor de gereduceerde prijs van f 25,- of 485 F.

Abonnementsprijs (12 nummers per jaar, incl. porto):

Voor Nederland, resp. België:

f 105,- of 2025 F. (per 1-1-88)

Prijs voor studenten: f 80,- of 1550 F. (per 1-1-88)

Overige landen: + f 35,- extra porto

(zeepost) of + f 45,- tot f 120,-

(luchtpost).

Losse nummers: f 10,00 of 200 F

(excl. verzendkosten).

Abonnementen op NATUUR en TECHNIEK kunnen ingaan per 1 januari of per 1 juli, (eventueel met terugwerkende kracht) doch worden dan afgesloten tot het einde van het lopende abonnementsjaar.

Zonder schriftelijke opzegging vóór het einde van elk kalenderjaar, wordt een abonnement automatisch verlengd voor de volgende jaargang. TUSSENTIJDEN kunnen geen abonnementen worden geannuleerd.

Postrekeningen:

Voor Nederland: nr. 1062000 t.n.v.

Natuur en Techniek te Maastricht.

Voor België: nr. 000-0157074-31

t.n.v. Natuur en Techniek te Brussel.

Bankrelaties:

Voor Nederland: AMRO-Bank N.V. te

Heerlen, nr. 44.82.00.015.

Voor België: Kredietbank Brussel,

nr. 437.6140651-07.

ANVERS



GLOBE

In het begin van de jaren tachtig waren de ruimtelijke puzzels zeer in trek. Deze belangstelling is opgewekt door de magische kubus van Rubik. Vele varianten hebben deze puzzel opgevolgd, waaronder de cilinder, de tetraëder en dergelijke.

Alle opvolgers waren echter eenvoudiger dan de magische kubus. Het gevolg is, dat de belangstelling voor de ruimtelijke puzzel tot een minimum is teruggelopen.

Met de hier beschreven puzzel is een nieuwe uitdaging gecreëerd: is deze puzzel oplosbaar of niet?

De puzzel is gebaseerd op het regelmatig twaalfvlak, maar dan uitgevoerd als bol. De dodecaëder wordt gevormd door twaalf regelmatige vijfhoeken die regelmatig om een ruimtelijk middelpunt zijn gerangschikt. De dodecaëder heeft dus zes assen. Elke as loopt door het ruimtelijke middelpunt van het twaalfvlak, en door de middelpunten van twee tegenover elkaar liggende regelmatige vijfhoeken op het oppervlak van de dodecaëder. De zes assen staan alle met elkaar onder dezelfde hoek van 63,435 graden.

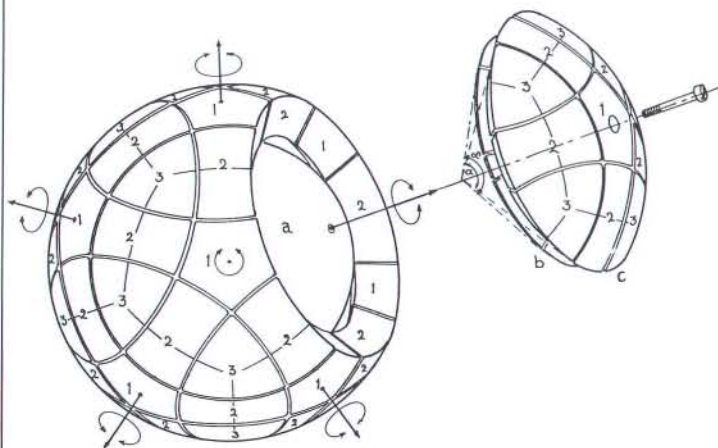
De puzzel is opgebouwd uit drie bolvormige systemen. Het hart van de puzzel wordt gevormd door de zuivere bol a. Daaromheen ligt systeem b, een bolvormige schil die nauwkeurig aansluit aan de centrale bol. Dit systeem is doorsneden door kegelvormige oppervlakken met een tophoek van ongeveer 110 graden, waarvan de toppen liggen in het ruimtelijk middelpunt en waarvan de assen samenvallen met de assen van de aan de puzzel ten grondslag liggende dodecaëder. Om bol b ligt een derde bol c die nauwkeurig aansluit op systeem b. Ook systeem c bestaat uit meerdere stukken. Evenals b is

deze bol doorsneden door kegelvormige oppervlakken die dezelfde positie hebben als de kegelvormige oppervlakken die systeem b doorsnijden, echter met het verschil dat de tophoek nu ongeveer 100 graden is. De overeenkomstige componenten van de systemen b en c zitten aan elkaar vast, zodat deze samengestelde componenten de elementen vormen zoals deze hieronder zijn weergegeven. Elk element is dus opgebouwd uit een component van systeem b, ook wel het onderlichaam genoemd, en een component van systeem c, het bovenlichaam dat van buitenaf zichtbaar is. Op deze wijze zijn totaal 62 elementen gevormd die zich alle aansluitend op de centrale bol bevinden.

Er zijn twaalf vijfhoekige elementen. Dit zijn de as-elementen. Deze as-elementen zijn draaibaar vastgezet op de centrale bol, precies op die plaatsen waar de zes assen van de dodecaëder uit het

centrale boloppervlak treden. Voorts zijn er 30 vierhoekige elementen, de kantelementen. Ten slotte zijn er nog 20 driehoekige elementen, de hoeelementen.

Al deze elementen zijn dus regelmatig op de centrale bol gerangschikt en vormen aldus twaalf groepen die elk om hun as kunnen worden gedraaid, dank zij de kegelvormige grensvlakken tussen de elementen onderling en de sferische grensvlakken tussen de drie systemen a, b en c onderling. Door de toepassing van de onderen bovenlichamen ontstaat een constructie die niet uit elkaar valt als de as-elementen draaibaar vastgezet zijn op de centrale bol. Elk kantelement bevindt zich in twee draaibare groepen en elk hoeelement bevindt zich in drie draaibare groepen. Door de groepen afwisselend te draaien kunnen de kant- en hoeelementen over het gehele boloppervlak worden verplaatst. Door het centrale oppervlak van elke groep een eigen kenmerk mee te geven bijvoorbeeld een kleur, wordt de bol omgevormd tot een puzzel. Zoals uit publikaties over de ma-



gische kubus bekend is, wordt de complexiteit van een puzzel uitgedrukt in het aantal positiemogelijkheden waarin de puzzel zich kan bevinden. Voor de kubus met zes as-, twaalf kant- en acht hoekelementen is dit getal globaal $8,858 \cdot 10^{22}$, gegeven door de berekening $46! \cdot 12! \cdot 2! \cdot 8! \cdot 3^8 / 3 \cdot 2^3$.

Een analoge berekening voor Anvers Globe geeft een aantal posities van globaal $1,536 \cdot 10^{75}$. Wellicht de beste vergelijking om het enorme verschil in complexiteit tussen de superkubus en de globe voorstelbaar te maken is wanneer we elke positie van de puzzels vertalen in één molekuul zand. Dan heeft de superkubus 1,5 gram zand aan mogelijkheden: een theelepeltje. Anvers Globe staat dan gelijk met $2,5 \times 10^{49}$ kilogrammassa. Voorbijgaand aan de invloed van de zwaartekracht op het volume kan men zich deze massa voorstellen als een hemellichaam met een diameter van ongeveer 3×10^{12} km. Het licht zou er 111 dagen over doen om van de ene kant van dit lichaam door het midden naar de andere kant van het oppervlak te komen. Ons planetenstelsel zou er geheel door worden omvat. De puzzel die op de foto is afgebeeld is ongeveer 10^8 minder complex, aangezien de stand van de aselementen niet belangrijk is.

AMATEUR ONDERZOEK IN NATUUR & TECHNIEK

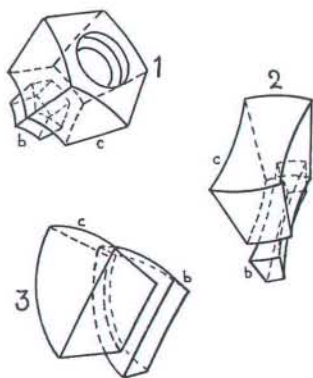
Veel lezers van Natuur & Techniek werken elke dag op een laboratorium, of zijn op een andere manier met onderzoek bezig. Anderen volgen een opleiding, zijn baanloos, of werken niet in 'het onderzoek'.

De redactie van Natuur & Techniek is benieuwd of de interesse in natuurwetenschappen en techniek, die de lezers van dit blad met elkaar delen, ook resulteert in eigen onderzoek. Wellicht trekt u al jaren iedere dag het veld in om broedvogels te inventariseren; misschien werkt u avond aan avond in uw laboratorium in de garage aan de synthese van de meest wonderlijke stoffen; wellicht bouwt u robots die de gordijnen sluiten als het donker is. De redactie wil graag eens zien hoe inventief de lezers van Natuur & Techniek zijn en wil dat ook aan de andere lezers tonen. Vanaf november zullen we daarom maandelijks één pagina aan een onderzoek van een lezer(es)

wijden. De redactie nodigt vrijetijd-onderzoekers, oud en jong, daarom uit de opzet, uitvoering en resultaten van eigen onderzoek kort en bondig te beschrijven in maximaal 350 woorden. Maximaal drie afbeeldingen zijn als toelichting mogelijk, graag hebben we daarbij minimaal één foto.

Maandelijks kiest de redactie één van de inzendingen voor publicatie uit. Met de auteur(s) zal dan nog overleg over tekst en illustratie plaatsvinden. De beloning voor plaatsing is een jaarabonnement op Natuur & Techniek en een boek uit het fonds van Natuur & Techniek. Inzendingen die voor 1 oktober binnen zijn kunnen overwogen worden voor plaatsing in het novembernummer.

Stuur uw onderzoekverslag naar:
Natuur & Techniek
Eigen onderzoek
Postbus 415
6200 AK Maastricht



Wordt bijvoorbeeld op het oppervlak van de puzzel de wereldbol afgebeeld dan is ook de draai-positie van de aselementen bepaald en heeft de globe dus zijn maximale complexiteit.

Een prototype van deze puzzel is gebouwd door ir A.N. Verveen uit Leiden. Geïnteresseerde lezers, die wellicht Rubik's kubus nog wel eens ter hand nemen en over oplossingen van Anvers Globe willen discussiëren, kunnen via de redactie met de auteur van de puzzel in contact komen. Verveen

bouwt momenteel een robuust model van de puzzel uit epoxyhars dat zou kunnen worden ge-exposeerd.

OPGAVEN & PRIJSVRAAG

Vragen?

Ook in dit nummer weer een aantal toetsvragen om de bruikbaarheid van Natuur & Techniek in het onderwijs te vergroten. Ze horen bij het artikel 'Erfelijkheid en milieu' op pag. 662-673 en zijn opgesteld door mw drs J. Nater-Hak uit Drachten.

1. Een ouderpaar krijgt vier tweelingen. De acht kinderen zijn drie meisjes en vijf jongens.
 - a. Hoeveel MZ-tweelingen kunnen dit maximaal zijn?
 - b. Hoeveel DZ-tweelingen kunnen dit maximaal zijn?
2. Een bepaalde vorm van kleurenblindheid berust op het voorkomen van een recessief allel op het X-chromosoom. Stel dat één individu van een tweeling kleurenblind is. Kan hier sprake zijn van een MZ-tweeling, een DZ-tweeling of kunnen beide typen?
3. Stel dat de vader kleurenblind is en de moeder draagster.
 - a. Hoe groot is de kans dat er een MZ-tweeling ontstaat, waarvan beide partners kleurenblind zijn?
 - b. Hoe groot is de kans dat er een DZ-tweeling ontstaat, waarvan beide partners kleurenblind zijn?
 - c. Hoe groot is de kans dat er een DZ-tweeling ontstaat, waarvan het meisje kleurenblind is en de jongen niet?
4. Stel dat één blauwe druif twee pitten bevat. Uit elk van de pitten ontstaat een druiveplant.
 - a. Zijn deze druiveplanten te vergelijken met een tweeling? Licht het antwoord toe.
 - b. Zo ja, is het een MZ-tweeling, een DZ-tweeling of kan het beide zijn? Licht het antwoord toe.
5. DZ-tweelingen kunnen van gelijk geslacht of van ongelijk geslacht zijn. Als 31% van *alle* tweelingen van ongelijk geslacht is, hoe groot is dan het percentage MZ-tweelingen?
6. Wat zijn dichoriale tweelingen?
7. Wat mogen we concluderen als MZ-tweelingen voor een bepaalde eigenschap meer op elkaar lijken dan DZ-tweelingen?

Oplossing juni

In verband met de vakantie was de inzendingstermijn voor de prijsvraag van juni een maand later gesteld. De oplossing konden we daarom niet meer in dit nummer meenemen. Volgende maand publiceren we de oplossingen en prijswinnaars van de puzzels uit het juni- en julinummer.

De nieuwe opgave

Acht kaarten liggen gerangschikt als op de tekening te zien is.

Gegeven is:

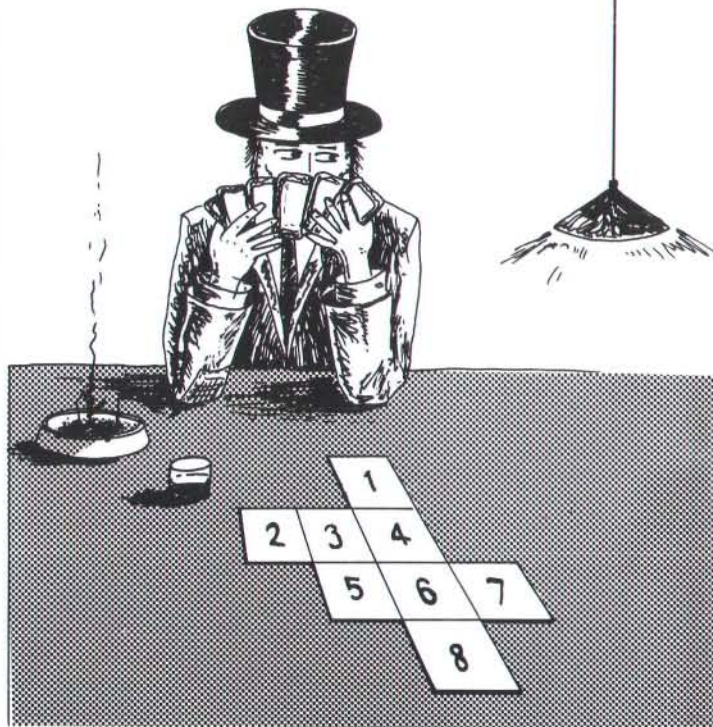
- Er zijn twee azen, twee heren, twee vrouwen en twee boeren.
- Elke aas grenst aan een heer.
- Elke heer grenst aan een vrouw.
- Elke vrouw grenst aan een boer.
- Geen twee kaarten van dezelfde soort grenzen aan elkaar.

De vraag is: welke kaart is nummer 6?

Prijsvraag

Oplossingen op dit vraagstuk, ons ter beschikking gesteld door de organisatie van de Nederlandse Wiskunde Olympiade, moeten uiterlijk 19 september op de redactie zijn om mee doen in de loterij onder goede inzenders die de winnaar van een boek uit de Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur & Techniek oplevert. Alle goede inzenders krijgen zes punten voor de laddercompetitie. Door iedere maand een juiste oplossing in te sturen verzamelt u langzaam maar zeker zoveel punten dat u boven aan de ladder komt. Dit levert een gratis jaarabonnement op Natuur & Techniek op. Is dat binnen, dan verliest u alle ladderpunten, zodat zij die na u komen ook een kans hebben, en uzelf ook weer.

Oplossingen sturen aan:
Natuur & Techniek
Prijsvraag
Postbus 415
6200 AK Maastricht



VOLGENDE MAAND IN NATUUR EN TECHNIEK

Slangegif

Gifslangen zijn griezels en hebben geen manieren. Ze injecteren hun prooi met gif, laten die vervolgens even spartelen en eten hem even later in één hap op. Dr A. Menez beschrijft de uitwerking van slangegif in het lichaam en hoe een tegengif bereid kan worden.



Vliegen

Vliegen is een gewone manier van reizen geworden. Prof ir H. Wittenberg beschrijft de evolutie van het verkeersvliegtuig van na de oorlog. Als rode draad daardoorheen loopt de ontwikkeling van steeds zuiniger en stillere motoren. Hoe de propeller verdween en daarna weer terugkwam.

Sudan

Heeft de Sahel ooit in bloei gestaan? Het is bijna niet voor te stellen, maar dit dorre deel van Afrika heeft ook vochtige klimaten gekend. Prof dr H. Dumont heeft dat mede afgeleid uit het onderzoek van de bodem van een meer in Sudan en de restanten van nederzettingen in de omgeving.

Korstmossen

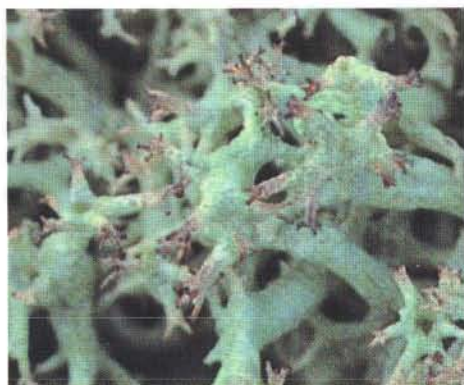
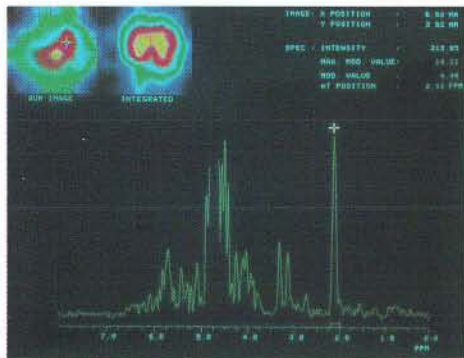
Korstmossen zijn geen mossen. Dr W. Kruyt doet uit de doeken dat deze naam slaat op een merkwaardige symbiose van een

schimmel en een wier. Hoe goed die twee het met elkaar kunnen hebben, blijkt wel als je bedenkt dat korstmossen in zeer onleefbare milieus kunnen voorkomen.

NMR

Alweer NMR, dat hadden we toch ook al in dit nummer? Inderdaad, NMR-specialist dr P.R. Luyten schreef nóg een artikel, nu han-

delend over NMR-spectroscopie. Dat is een techniek waarmee van buitenaf chemische processen in het lichaam gevolgd kunnen worden. Weer een mooi hulpmiddel voor artsen.



Vuursteen

Gedurende het grootste deel van de prehistorie was vuursteen het materiaal waarmee werktuigen werden gemaakt. Drs A.L. van Gijn houdt zich bezig met het onderzoek van vuurstenen voorwerpen en zij beschrijft hoe microscopisch kleine sporen het gebruik ervan verraden.



"Ik dacht, nu ben ik aan de beurt"

Het gaat om
betere levenskansen.
En eigenlijk is beter
nog niet goed genoeg.



**Koningin Wilhelmina Fonds voor de kankerbestrijding.
Daar kan niemand omheen.**

Sophialaan 8, 1075 BR Amsterdam. Telefoon 020-6640991, Giro: 26.000, Bank 70.70.70.007.

De landelijke collecte voor de kankerbestrijding loopt van 29 augustus tot 12 september 1988.

Publicatie aangeboden door dit blad, in samenwerking met de Stichting Ideële Reclame

SIRE

SOMMIGE SLECHTZIENDEN ZIEN DAT

SOMMIGE GOEDZIENDEN ZOUDEN DAAR EENS AAN MOETEN DENKEN.

Zo'n honderdduizend Nederlanders hebben te kampen met slechtziendheid.

Dat is niet zielig, maar wel verdraaid lastig. Want sommige slechtzienden kunnen bijvoorbeeld overdag redelijk goed zien.

Maar 's avonds praktisch geen snars.

Anderen zien een paar vierkante centimeter scherp, maar alles er omheen wazig.

Zo zijn er vele vormen van slechtziendheid, waar weinig of niets aan te doen is.

U kunt er wel iets aan doen.

Heel af en toe. Gewoon door begrip te tonen.

Of waar nodig een helpende hand uit te steken.

Soms herkent u een slechtziende aan de button die verkrijgbaar is bij de Nederlandse Vereniging van Blinden en Slechtzienden, Postbus 2344, 3500 GH Utrecht, telefoon 030 - 93 11 41.

